



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SÃO PAULO**



ARYANE CHRISTINE NEVES MARTINS

IGOR DE QUEIROZ RUGNO

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ABSORÇÃO DE CO₂ EM
COLUNA DE PULVERIZAÇÃO EMPREGANDO SOLUÇÕES
DE NaOH E Ca(OH)₂**

DIADEMA

2021

ARYANE CHRISTINE NEVES MARTINS

IGOR DE QUEIROZ RUGNO

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ABSORÇÃO DE CO₂ EM COLUNA
DE PULVERIZAÇÃO EMPREGANDO SOLUÇÕES DE NaOH E
Ca(OH)₂

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como exigência parcial
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Química de Aryane
Christine Neves Martins e Igor de
Queiroz Rugno ao Departamento de
Engenharia Química da Universidade
Federal de São Paulo – Campus
Diadema.

Orientador: Prof. Dra. Milene Costa
Codolo

DIADEMA

2021

Dados Internacionais da Catalogação na Publicação (CIP)

CHRISTINE NEVES MARTINS, ARYANE

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ABSORÇÃO DE CO₂ EM
COLUNA DE PULVERIZAÇÃO EMPREGANDO SOLUÇÕES DE
NaOH E Ca(OH)₂ / ARYANE CHRISTINE NEVES MARTINS, IGOR
DE QUEIROZ RUGNO. – – Diadema, 2021.

57 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia
Química) - Universidade Federal de São Paulo - Campus
Diadema, 2021.

Orientadora: MILENE COSTA CODOLO

1. ABSORÇÃO QUÍMICA. 2. TORRE DE SPRAY. 3. HIDRÓXIDO
DE CÁLCIO. 4. HIDRÓXIDO DE SÓDIO. 5. GÁS CARBÔNICO. I.
QUEIROZ RUGNO, IGOR DE. II. Título.

**ARYANE CHRISTINE NEVES MARTINS
IGOR DE QUEIROZ RUGNO**

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ABSORÇÃO DE CO₂
EM COLUNA DE PULVERIZAÇÃO EMPREGANDO
SOLUÇÕES DE NaOH E Ca(OH)₂**

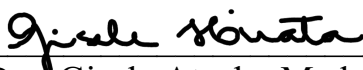
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como exigência parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química, ao Instituto de
Ciências Ambientais, Químicas e
Farmacêuticas da Universidade Federal
de São Paulo – Campus Diadema.

Aprovado em: 24/02/2021

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. Milene Costa Codolo
Orientadora



Prof. Dra. Gisele Atsuko Medeiros Hirata



Prof. Dr. Ricardo de Freitas Fernandes Pontes

Diadema (SP)
2021

RESUMO

Nos últimos 300 anos, o nível de CO₂ na atmosfera cresceu consideravelmente. Esse aumento é causado principalmente pela ação antropogênica, influenciando no efeito estufa e causando alterações climáticas. Diante dessa conjuntura, as Tecnologias CCS (*Carbon Capture and Storage*) apresentam-se como mecanismos de captura de CO₂ presente na atmosfera e/ou originado em processos industriais. Dentre esses sistemas, a absorção destaca-se como uma operação unitária que, sob condições e com reagentes específicos, é capaz de diminuir a quantidade de CO₂ presente em uma mistura gasosa. A proposta do presente trabalho foi analisar processo de absorção do CO₂ presente em uma corrente gasosa, utilizando soluções hidróxido de cálcio e hidróxido de sódio como soluções absorvedoras em uma torre de *spray*. Visando isso, foi montada uma bancada experimental constituída por uma torre de *spray* com diâmetro interno de aproximadamente 290 mm e altura útil para absorção de 600 mm. No sistema de absorção preparado, utilizou-se uma mistura de ar e CO₂ engarrafado sob velocidades que variavam de 0,05 a 0,15m/s. Essa corrente entrou em contato com soluções de hidróxido de sódio e hidróxido de cálcio submetidas a ação de bicos pulverizadores. A concentração de CO₂ na mistura gasosa foi medida antes e depois do processo de absorção para que fosse calculada a eficiência de remoção do gás carbônico do sistema montado. A eficiência de remoção utilizando hidróxido de sódio variou de 7 a 30 %, enquanto para a solução de hidróxido de cálcio foram de 9 a 20 %. Comparando os resultados obtidos com trabalhos similares da literatura científica, verificou-se a influência das vazões de gás e de líquido no processo de absorção, assim como a altura da torre e concentração das soluções utilizadas.

Palavras-chave: absorção; torre de *spray*; hidróxido de cálcio; hidróxido de sódio; gás carbônico;

SUMÁRIO

1. Introdução.....	6
2. Objetivos.....	8
3. Revisão Bibliográfica	9
3.1 Propriedades do dióxido de carbono	10
3.1.1 Fonte de emissões de CO ₂	12
3.2 Medidas para reduzir as emissões de CO ₂	14
3.2.1 Técnicas de remoção de carbono pós-combustão.....	15
3.3 Princípios da absorção gasosa	19
3.3.1 Soluções utilizadas como solvente em processo de absorção de CO ₂	22
3.3.2 Hidróxido de Cálcio	24
3.3.3 Hidróxido de sódio	26
3.4 Equipamentos utilizados para absorção	27
3.4.1 Torres de <i>Spray</i>	28
4. Materiais e Métodos.....	30
4.1 Bancada Experimental	30
5. Resultados e discussão.....	36
6. Conclusão	46
Bibliografia.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Concentração de CO ₂ na atmosfera e quantidade emitida do gás ao longo do tempo.	13
Figura 2: Esquema de interação entre gás carbônico e solvente.	19
Figura 3: Representação do fluxo em absorção concorrente líquido-gás.	21
Figura 4: Representação do fluxo em absorção contracorrente líquido-gás.	22
Figura 5. Esquematização da torre de <i>spray</i>	28
Figura 6: Esquematização da torre de <i>spray</i>	30
Figura 7: Esquema da bancada experimental.	31
Figura 8: Bico pulverizador utilizado na bancada experimental.	33
Figura 9: Configurações dos bicos pulverizadores utilizados na torre de <i>spray</i>	35
Figura 10: Eficiência NaOH variando velocidade e vazão.	38
Figura 11: Eficiência Ca(OH) ₂ variando velocidade do gás e vazão de líquido.	38
Figura 12: Eficiência versus velocidade do gás para NaOH e Ca(OH) ₂ em diferentes vazões.	40
Figura 13: Razão L/G e eficiência para a solução de NaOH estudada.	43
Figura 14: Razão L/G e eficiência para a solução de Ca(OH) ₂ estudada.	43
Figura 15: Razão L/G e eficiência obtidos por Zhenqi et al. (2009) em seu estudo com NaOH.	44
Figura 16: Razão L/G e eficiência obtidos por Srichat et al. (2017) para a solução de Ca(OH) ₂ 0,1M.	44
Figura 17: Razão L/G e eficiência obtidos por Srichat et al. (2017) para a solução de Ca(OH) ₂ 0,2M.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades físico-químicas do gás carbônico.	11
Tabela 2: Métodos pós-combustão e suas vantagens e desvantagens.	16
Tabela 3: Cálculos realizados para absorção com solução de hidróxido de sódio....	34
Tabela 4: Cálculos realizados para absorção com solução de hidróxido de cálcio. ...	34
Tabela 5: Dados de vazão de gás (Q_g) e cálculos das respectivas velocidades.	36
Tabela 6: Dados obtidos para absorção de gás carbônico utilizando solução de hidróxido de sódio.	36
Tabela 7: Dados obtidos para absorção de gás carbônico utilizando solução de hidróxido de cálcio.....	37
Tabela 8: Comparação das vazões de líquido, gás e eficiência para cada solução..	42

1.Introdução

O dióxido de carbono (CO_2) é um componente natural da atmosfera terrestre, geleiras, oceanos e águas subterrâneas. Esse gás é produzido em processos metabólicos de seres aeróbios e na combustão completa ou incompleta de combustíveis, como gás natural, lenha, carvão, entre outros (MENDOZA, 2017; IPCC, 2005; SERPA *et al.*, 2011).

A concentração de CO_2 na atmosfera vem crescendo significativamente desde o século XVIII, período marcado pela Revolução Industrial. Esse aumento é devido, especialmente, à queima de combustíveis fósseis, à indústria cimenteira, à queima de biomassa não renovável e à produção energética (IPCC, 2007; EPA, 2020; IEA, 2020). Toda essa elevação nos níveis de CO_2 atmosférico influi diretamente no efeito estufa, fenômeno natural que mantém a temperatura terrestre a níveis adequados para a sobrevivência dos seres vivos. O CO_2 desempenha importante papel nesse cenário já que sua quantidade total na atmosfera contribui cerca de 60 % para o resultado do efeito estufa, influenciando significativamente no equilíbrio da radiação solar do planeta, fazendo com que ocorra maior retenção de calor e aumento da temperatura global (SANTOS *et al.*, 2017; IPCC, 2007). Essa mudança no clima terrestre influi no equilíbrio de ecossistemas, aumenta a ocorrência de eventos climáticos extremos e contribui para a desertificação e elevação do nível oceânico, por exemplo (PINTO *et al.*, 2008). Nessa conjuntura global, muitos países implantaram políticas que visam o uso de energias mais limpas e o desenvolvimento sustentável, buscando mecanismos que resultem na redução de gases do efeito estufa, principalmente, do gás carbônico (JUNIOR *et al.*, 2010).

Tecnologias CCS (*Carbon Capture and Storage*) compreendem vários sistemas de engenharia que possibilitam a captura de CO_2 presente na atmosfera e/ou originado em processos industriais, além de destinar sua utilização para indústrias ou armazenamento posterior (KOHL & NIELSEN, 1997). Como a grande parte do CO_2 de origem antropogênica é subproduto da combustão de combustíveis fósseis, as tecnologias de sequestro de CO_2 são geralmente classificadas como sistemas de pré-combustão, oxicomustão e pós-combustão. Esta última abrange sistemas que separam o CO_2 de outras correntes produzidas antes de sua liberação para atmosfera (RUBIN *et al.*, 2012; SUBRAMANIAN *et al.*, 2017).

Absorção, adsorção, criogenia e separação por membranas são algumas das técnicas pós-combustão mais utilizadas para separar o CO₂ de outras correntes de saída produzidas por uma reação de combustão ou por outras reações químicas envolvidas em determinado processo. A absorção destaca-se entre as demais técnicas pois oferece alta seletividade e eficiência de captura e menor custo de energia (IPCC, 2005; WONG, 2002 SUBRAMANIAN *et al.*, 2017).

A absorção é uma operação unitária que separa componentes de uma mistura ou solução, ocorrendo transferência de massas entre fases. O processo de absorção gasosa consiste na transferência de um componente, denominado soluto, entre fase gasosa e fase líquida. O soluto sai da fase gasosa, alcança a interface gás-líquido e passa para a fase líquida. Essa transferência de massa depende das condições termodinâmicas deste processo (CREMASCO, 2008). Em tecnologias CCS, o soluto é o CO₂, a fase gasosa consiste na corrente de saída de combustão, por exemplo, e a fase líquida é o solvente, ou solução absorvente, empregado no processo.

Um sistema de absorção deve conter um dispositivo que permita uma maior área superficial de contato entre as fases gasosa e líquida, de tal modo que o processo de transferência de massa seja favorecido. Os principais dispositivos utilizados são as torres de nebulização (ou *spray*), torres de borbulhamento e torres de recheios (KHOL & NIELSEN, 1997; CREMASCO, 2008).

Em torres de *spray*, a fase gasosa, denominada contínua, escoar no equipamento e a líquida é inserida e dispersa por atomizadores na forma de *spray* (CREMASCO, 2008). Esse tipo de equipamento garante alta velocidade relativa entre gás e líquido, possui grande superfície de contato e estrutura simples, além de ter baixo custo de manutenção, baixa queda de pressão e uma grande capacidade de processamento (CODOLO, 2013; LEILEI & ZHAO, 2012).

Em relação aos solventes utilizados na absorção de gás carbônico, em literatura científica, há várias referências que mencionam o uso de diversas soluções para esse propósito, destacando-se os solventes a base de aminas, soluções de hidróxido de sódio (NaOH), de hidróxido de potássio (KOH), de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), entre outros (GONDAL, 2014; HAN *et al.*, 2011).

Embora muito utilizadas devido à alta eficiência de captura de CO₂, soluções absorventes a base de aminas, como a monoetanolamina (MEA) apresentam desvantagens como degradação, capacidade de corroer equipamentos e

alta demanda energética de recuperação (HAN *et al.*, 2011; MUKHERJEE *et al.*, 2019). Assim, nas últimas duas décadas, estudos envolvendo a absorção de CO₂ a partir de soluções de hidróxidos de metais alcalinos vêm merecido atenção de pesquisadores (GONDAL, 2014). É o caso de soluções de hidróxido de cálcio e hidróxido de sódio, por exemplo. Essas duas soluções, por exemplo, possuem menor preço de mercado, menor complexidade de reações químicas e são mais abundantes (YOO *et al.*, 2013; HAN *et al.*, 2011). Além disso, alguns estudos verificaram uma relevante eficiência das duas soluções removerem CO₂ em sistemas de tratamento de biogás, por exemplo TIPPAYAWONG & THANOMPONGCHART (2010), LASOCKI *et al.* (2015) e MEL *et al.* (2014).

2. Objetivos

O objetivo do presente trabalho é avaliar o processo de absorção do CO₂ presente em uma corrente gasosa, utilizando soluções hidróxido de cálcio e hidróxido de sódio como soluções absorvedoras em uma torre de *spray*. Para essa avaliação, buscou-se:

- Verificar eficiência do processo de absorção;
- Comparar a eficiência das soluções absorventes empregadas;
- Analisar a Influência das velocidades do gás e das soluções no processo de absorção.

3. Revisão Bibliográfica

O gás carbônico é emitido em muitos processos industriais, o que causa aumento de sua concentração na atmosfera e esse aumento causa consequências como aumento da temperatura global, derretimento de geleiras, aumento do nível do mar, entre outros. Disso, vem a importância no controle ou captura das emissões realizadas (IPCC, 2007).

A importância do controle e captura das emissões do gás carbônico no mundo atual se deve a ligação deste gás ao agravamento do efeito estufa. Esse gás segue fluxo próprio, porém, as atividades industriais têm feito com que a adição de CO₂ na atmosfera seja muito maior do que a retirada feita por seres fotossintetizantes, gerando acúmulo (PACHECO & HELENE, 1990; CARVALHO, 2018).

O efeito estufa é um processo natural que possibilita a manutenção da temperatura na Terra. Com esse mecanismo, a temperatura da Terra atinge valores maiores do que os que seriam obtidos na ausência de atmosfera. Isso ocorre porque determinados gases absorvem parte da radiação solar infravermelha emitida pela superfície do planeta e emitem parte dessa energia absorvida de volta à superfície, resultando, assim, em um aumento na temperatura próxima à superfície da Terra (IPCC, 2007).

Os Gases do Efeito Estufa (GEE) compreendem menos de 1% da composição da atmosfera e os principais representantes são: vapor d'água, clorofluorcarbonetos, ozônio, dióxido de carbono, metano e óxido nitroso (LOPES, 2017; IPCC, 2007). Desses GEE's, o CO₂ apresenta papel fundamental pois sua quantidade total presente na atmosfera contribui cerca de 60 % para o resultado do efeito estufa (SANTOS *et al.*, 2017).

A concentração de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso na atmosfera tem crescido consideravelmente, especialmente após o século XVIII. A atividade antrópica utiliza recursos naturais, como carvão e petróleo, converte ecossistemas nativos para agrossistemas (desmatamento) e isso influencia significativamente no equilíbrio da radiação solar do planeta, fazendo com que ocorra maior retenção de calor e aumento da temperatura global, o que traz como

consequência o chamado aquecimento global (IPCC, 2007). Estima-se que a temperatura média global tenha aumentado entre 1 ° e 1,2 °C desde o período pré-industrial. Nas últimas décadas, as temperaturas globais aumentaram acentuadamente, quando comparado com os valores do período de 1960 a 1990 (RITCHIE & ROSER, 2017). Como consequências desse processo, pode-se destacar:

- Aumento na frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, tais como enchentes, tempestades, furacões e secas;
- Elevação do nível do mar;
- Mudanças nos ecossistemas;
- Desertificação;
- Interferências na agricultura devido à alteração no regime de chuvas e alterações climáticas;
- Impactos na saúde e bem-estar da população humana (PINTO *et al.*, 2008).

Embora absorva menos calor que outros GEE como N_2O e CH_4 , a quantidade emitida de CO_2 faz com que esse gás seja o GEE antropogênico mais importante, tendo maior contribuição para o aquecimento global do que todos os outros gases juntos. Além disso, o CO_2 permanece na atmosfera por mais tempo (IPCC, 2007; LINDSEY, 2020).

Mesmo com o ciclo do CO_2 , a velocidade de adição de CO_2 na atmosfera, devido à ação humana, ocorre a uma taxa muito superior à sua retirada, gerando acúmulo (PACHECO & HELENE, 1990; CARVALHO, 2018). Até mesmo os seres fotossintetizantes, como plantas e algas, que absorvem CO_2 em seus processos metabólicos, não são suficientes para equilibrar a quantidade desse gás no ambiente terrestre (PEARCE, 2002).

3.1 Propriedades do dióxido de carbono

O gás carbônico está presente naturalmente na atmosfera terrestre, águas subterrâneas, geleiras e oceanos. Em temperaturas e pressões normais, esse gás é

classificado como um gás livre, incolor, inodoro, não combustível e não tóxico (SERPA *et al.*, 2011; IPCC, 2005). A Tabela 1 apresenta algumas propriedades físico-químicas dessa substância.

Tabela 1. Propriedades físico-químicas do gás carbônico.

Propriedade	Valor
Massa molecular	44,0 g/mol
Ponto de fusão a 5,2 atm	- 56,6°C
Temperatura Crítica	31°C
Pressão Crítica	72,9 atm
Pressão de Vapor a - 78,2 °C	760 mmHg
Viscosidade a 0 °C	0,1 cP
Solubilidade em água a 25 °C	0,141g/100 mL de água
Calor latente de vaporização	83 cal/g

Fonte: CETESB, 2020

Quanto a sua síntese, o gás carbônico pode ser gerado por meio da combustão completa ou incompleta de combustíveis, como gás natural, lenha, carvão, entre outros. A reação 1 apresenta a combustão completa com formação de CO₂ enquanto as reações 2 e 3 apresentam a combustão incompleta. Além disso, há formação de CO₂ durante processos metabólicos de seres aeróbios, como a respiração, durante processos fermentativos e de decomposição de materiais orgânicos (MENDOZA, 2017; IPCC, 2005).



Quanto a sua utilização na indústria, o dióxido de carbono pode ser empregado em máquinas de refrigeração; na produção de gelo seco; em extintores de incêndio; em processos de tratamento de efluentes alcalinos; em análises químicas; em processos de carbonatação de bebidas; na produção de ureia; e na produção de metanol (MENDOZA, 2017).

3.1.1 Fonte de emissões de CO₂

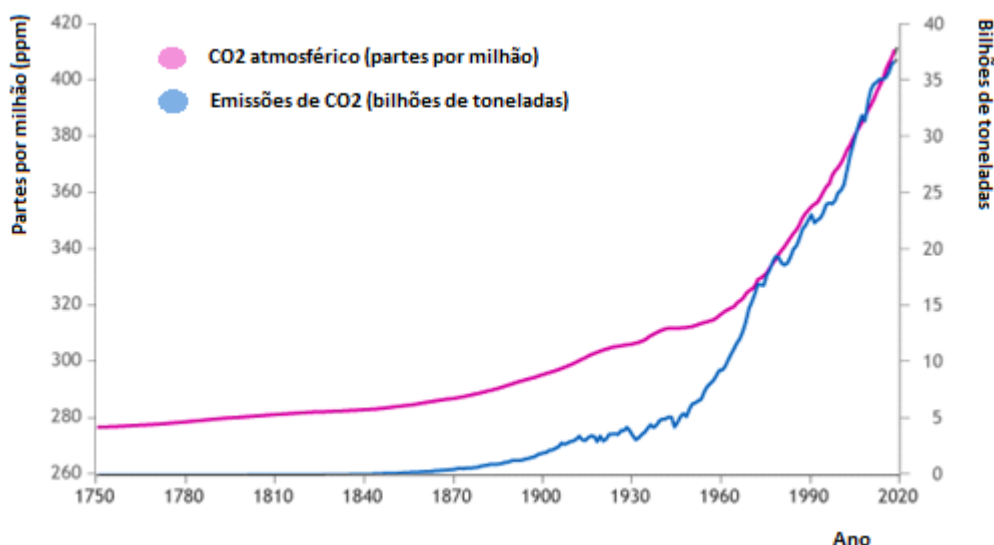
A queima de combustíveis fósseis, a produção de cimento, desmatamento e queima de biomassa não-renovável constituem as principais causas do aumento do CO₂ atmosférico (IPCC, 2007).

Desde 1990, o setor de produção de calor e eletricidade é o que mais emite CO₂ no mundo, com mais de 13 milhões de toneladas, abastecendo residências, empresas e indústrias. No setor de transporte, a produção de CO₂ está relacionada ao uso de combustíveis, como gasolina e diesel, em carros, ônibus, caminhões, navios, aviões e trens (EPA, 2020; IEA, 2020).

Vários processos industriais também produzem grandes quantidades de CO₂ por meio de reações químicas que não envolvem combustão. É o caso de cerâmicas, cimenteiras e indústrias de metais como ferro e aço (EPA, 2020; CARVALHO, 2018). É importante ressaltar que além do CO₂ gerado durante o processo, há também o CO₂ emitido devido à queima de combustível que alimenta o sistema de produção. Segundo Couto *et al.* (2014), além de representar um problema ambiental, o CO₂ gerado em alguns processos industriais também é considerado uma impureza que deve ser removida a fim de aumentar a qualidade do produto gasoso principal e evitar problemas como envenenamento de catalisadores.

Em 2018, foram emitidos mais de 36 bilhões de toneladas de CO₂ à atmosfera ao redor do mundo. China, Estados Unidos e Índia, juntos, forneceram quase 50 % desse total, ocupando, respectivamente, as três primeiras posições no *ranking* de países que mais emitiram CO₂ no mundo. Na mesma lista, o Brasil ocupa a 14^a posição, com 457 milhões de toneladas emitidas nesse mesmo ano (GLOBAL CARBO ATLAS, 2020). A Figura 1 apresenta de forma gráfica a elevação dos níveis de CO₂ na atmosfera terrestre, ao longo dos anos, desde o período da Revolução Industrial até 2019.

Figura 1. Concentração de CO₂ na atmosfera e quantidade emitida do gás ao longo do tempo.



Fonte: LINDSEY, 2020.

Para suprir as necessidades do modelo consumista global, no decorrer dos séculos, as emissões de CO₂ vem aumentando a cada ano, como demonstrado na Figura 1. Projeções do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*) (2007) indicam que, até 2100, a variação da temperatura média da Terra deverá variar entre 1,1 a 6,4 °C. Diante desse cenário, em diversos países, muitas políticas foram implantadas visando o uso de energias mais limpas e o desenvolvimento sustentável. Além disso, a busca por estratégias que resultem na redução de GEE levou governos mundiais a realizarem conferências e tratados internacionais, tais como, a conferência Rio-92 e o Protocolo de Kyoto (JUNIOR *et al.*, 2010).

O Protocolo de Kyoto foi assinado em 1997 e entrou em vigor em fevereiro de 2005. Segundo esse documento, cada país participante possui o dever de limitar e diminuir as emissões de gases de efeito estufa (MARCATTO & LIMA, 2013). Também, houve a criação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que estabelece várias diretrizes de ação, como os Créditos de Carbono. Nesse conceito, países desenvolvidos que não atingirem suas metas têm a liberdade para comprar créditos de carbono, em tonelada de CO₂ equivalente, de países em desenvolvimento encarregados por projetos de MDL. Cada tonelada de CO₂ que determinado país, onde um MDL está sendo desenvolvido, deixa de lançar à atmosfera gera um crédito de carbono (EIBEL & PINHEIRO, 2015).

3.2 Medidas para reduzir as emissões de CO₂

Para reduzir as emissões de CO₂, Rodrigues (2017) cita dois mecanismos que podem ser implantados visando esse objetivo: o uso de fontes de energia renovável, o que reduziria o uso de combustíveis poluentes; e/ou a remoção do gás carbônico presente em correntes de resíduos, para um armazenamento posterior, processo denominado como “sequestro de carbono”. Este procedimento é a única estratégia que possibilita o emprego contínuo de combustíveis fósseis, sendo uma alternativa aplicável para diminuir as emissões de CO₂ no ambiente.

Alguns processos podem realizar a conversão do CO₂ em outros compostos estáveis. Com a crescente necessidade de se reduzir as emissões deste gás existem diversas abordagens e estudos para o sequestro de carbono. O aumento da eficiência energética deve ser acompanhado da diminuição de emissão de gás carbônico. Devido aos limites de emissão implantados em países aderentes ao Protocolo de Kyoto sendo, inclusive, passíveis de multas e sanções administrativas em caso de descumprimento, o sequestro de carbono ganhou importância econômica (CARVALHO *et al.*, 2007).

O sequestro de carbono pode ser realizado de forma direta ou indireta. Esta última pode ser feita por reflorestamento com efeito de longo prazo. A forma mais eficiente possui um custo maior e consiste em separar o gás carbônico dos demais componentes e destinar sua utilização para indústrias como: alimentícia, medicinal, fabricação de metais, entre outros. Como a demanda da indústria por CO₂ é baixa em comparação a emissão, surgem novos estudos que envolvem armazenamento desta produção excedente. A Captura e Armazenamento de Carbono (CCS – *Carbon Capture and Storage*) compreende vários sistemas de engenharia que possibilitam a captura de CO₂ presente na atmosfera e/ou originado em processos industriais (KOHL & NIELSEN, 1997).

Além da captura, esses procedimentos envolvem técnicas para alterar o estado físico do CO₂, de tal forma que seja viável seu transporte posterior, assim como sua disposição final. Tecnologias CCS possibilitam o sequestro de CO₂ de uma mistura de gases e algumas encontram-se disponíveis no mercado, sendo muito

aplicadas em plantas de geração de energia e em processos industriais (SANTOS *et al.*, 2017; RUBIN *et al.*, 2012; CARVALHO *et al.*, 2007).

Como a grande parte do CO₂ de origem antropogênica é subproduto da combustão de combustíveis fósseis, as tecnologias de sequestro de CO₂ são geralmente classificadas como sistemas de pré-combustão, pós-combustão ou oxicomustão. Essa denominação refere-se à maneira com a qual o carbono (na forma de CO₂) é removido do processo, sendo antes ou depois do combustível ser queimado (RUBIN *et al.*, 2012).

Em tecnologias de pré-combustão, o combustível reage com oxigênio, ar ou vapor de água e depois segue para a combustão gerando, principalmente, CO e H₂. Essa mistura gasosa é direcionada de forma controlada até um reator catalítico onde o monóxido de carbono é convertido em CO₂ e separado do H₂. Este, por sua vez, segue para os sistemas de geração de energia (SANTOS *et al.*, 2017; RUBIN *et al.*, 2012).

Em tecnologias de oxicomustão, ocorre a combustão com oxigênio puro; reciclo de correntes de saída, constituídas, principalmente, por água e CO₂; e purificação da corrente de CO₂, que pode ser enviada diretamente para armazenamento. Nesse processo, devido à pureza do oxigênio, há formação de quantidades menores de poluentes como óxidos de nitrogênio e de enxofre (KANNICHE *et al.*, 2009; RUBIN *et al.*, 2012).

Com o aumento das emissões, além da redução, se faz necessária técnicas pós-combustão para redução da emissão do gás carbônico da atmosfera. Essas técnicas separam o CO₂ de outras correntes produzidas antes de sua liberação para atmosfera. Existem vários métodos disponíveis e tem implantação mais simples quando comparado às técnicas de pré-combustão (SUBRAMANIAN *et al.*, 2017).

3.2.1 Técnicas de remoção de carbono pós-combustão

A separação e captura do gás carbônico, após a sua formação pela combustão, pode ser realizada por: absorção, adsorção, criogenia, membranas, entre

outros novos processos em estudo (WONG, 2002). Todas essas técnicas estão relacionadas com a remoção do CO₂ pós-combustão, ou seja, o dióxido de carbono é separado de outras correntes de saída produzidas pela combustão ou por outras reações químicas envolvidas em determinado processo, pouco antes de sua liberação na atmosfera. Comparado às técnicas de pré-combustão e oxidação, o sistema de remoção pós-combustão é considerado mais simples de implantação e adaptação nas unidades de produção; abrange uma gama de métodos disponíveis e validados, capazes de suprir as demandas das indústrias. (SUBRAMANIAN *et al.*, 2017)

Abaixo são descritas essas técnicas e na Tabela 2 são apresentadas suas respectivas vantagens e desvantagens. (WONG, 2002)

- Absorção: Processo com transferência de massa de um soluto entre a fase gasosa e líquida, será explorado nos próximos tópicos.
- Adsorção: Trata-se de um processo que utiliza um composto, denominado adsorvente, que tenha forte interação com a substância de interesse. Em seguida, é necessário fazer dessorção para desfazer esta ligação.
- Criogenia: Trata-se de um processo de destilação à baixas temperaturas.
- Separação por membranas: São barreiras, predominantemente poliméricas, com permeabilidade seletiva a certos gases.

Tabela 2: Métodos pós-combustão e suas vantagens e desvantagens.

Método	Vantagens	Desvantagens
Absorção química	Reduz a concentração de gás carbônico a valores baixos	Não é econômico e necessita de torres absorvedoras relativamente grandes
Absorção física	Requer baixa quantidade de energia	Gás carbônico deve ter elevada pressão parcial

Adsorção	Eficiente operação energética	Não existe processo em escala industrial, dessorção pode ser difícil
Criogenia	Produção de gás carbônico pronto para transporte em tubulações	Leva os gases para temperaturas muito baixas, necessitando de muita energia, tornando este um dos processos mais caros
Permeação por membranas	Baixo custo de manutenção, não precisa de agente de separação, sistemas compactos	Porcentagem de gás carbônico removido é inferior aos outros processos, necessita de pesquisa para implantação

Fonte: WONG, 2002

Além da remoção de CO₂ pós-combustão, a remoção de CO₂ é um importante tópico de pesquisa no campo de estudos da purificação de biogás (LIU *et al.*, 2014)

Técnicas de captura pós-combustão também são utilizadas em sistemas de tratamento de biogás. Essa mistura de gases é produzida em condições de anaerobiose, por meio do metabolismo de microrganismos em substratos orgânicos e contém, principalmente, metano (CH₄) e CO₂, sendo gerada em escala industrial em plantas de tratamento de esgoto, aterros sanitários e digestores anaeróbios (NIEMCZEWSKA, 2012). Considerado uma fonte de energia renovável versátil, o biogás pode ser utilizado na produção de energia elétrica e calor, e também como combustível veicular, substituindo, assim, o uso de combustíveis fósseis (WEILAND, 2010). A presença de CO₂ e traços de outras substâncias, como o H₂S, reduzem o poder calorífico do biogás, diminuindo a eficiência da combustão (ANDRIANI *et al.*, 2014). Além dessa diminuição da qualidade energética, a presença de CO₂ também aumenta a densidade relativa do biogás, influenciando no volume de transporte e/ou armazenamento (MAGALHÃES *et al.*, 2004). A purificação do biogás geralmente é

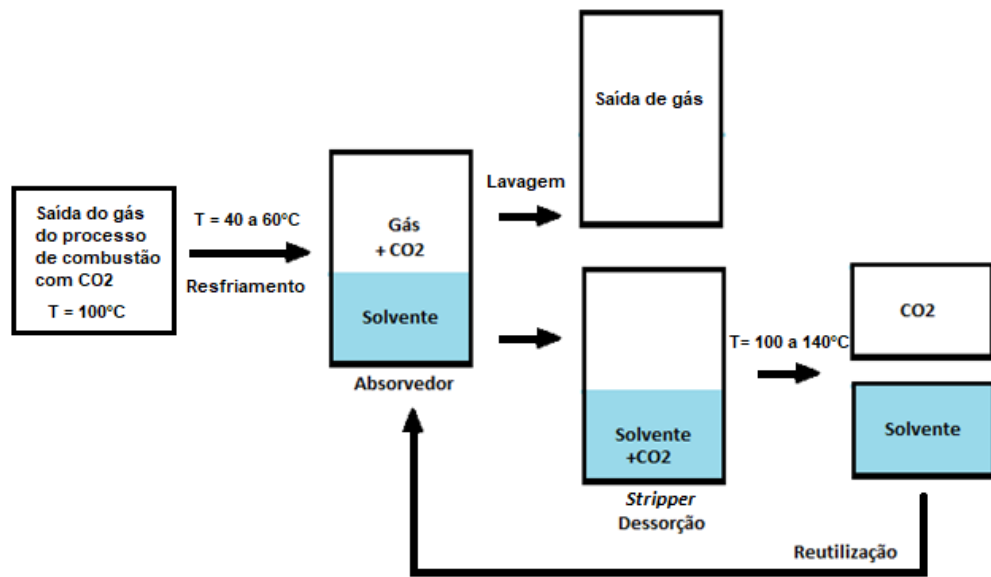
realizada para atender aos padrões de uso como combustível veicular ou para injeção em sistemas de gás natural. Após esse tratamento, o produto final é denominado biometano e contém entre 95 e 97 % de CH_4 e 1 a 3% de CO_2 e possui um maior potencial energético (RYCKEBOSCH *et al.*, 2011).

Dentre as tecnologias mais utilizadas para remover o CO_2 do biogás, Ryckebosch *et al.* (2011) destacam: absorção química ou física, adsorção, separação por membranas, separação criogênica e separação biológica, também conhecida como enriquecimento de metano. Dentre os métodos químicos Magalhães *et al.* (2004) ressaltam a absorção com uso de carbonato de potássio, hidróxido de cálcio e hidróxido de sódio.

Atualmente, as técnicas de absorção baseadas no uso de solventes químicos constituem-se a opção preferida em processos de remoção de CO_2 pós-combustão, oferecendo alta seletividade e eficiência de captura, e custo menor de energia, quando comparadas a outros processos de captura pós-combustão (IPCC, 2005). A absorção química é a operação com maior utilização para remoção de carbono em indústrias de petróleo (CARVALHO *et al.*, 2007).

Nesse tipo de sistema, utiliza-se uma reação química reversível entre uma solução aquosa alcalina com CO_2 . Após o resfriamento da mistura de saída do processo de combustão, que costuma estar a aproximadamente 100°C , essa corrente gasosa, contendo CO_2 , é submetida ao contato com o solvente. Necessita-se de um sistema para superar a queda de pressão, que ocorre no absorvedor, que atinge temperaturas entre 40 e 60°C . Após o processo de absorção, a corrente de gás passa por uma etapa de lavagem com água a fim de retirar qualquer gotícula ou vapor de solvente aderidos. O solvente rico em CO_2 é bombeado para um sistema de regeneração chamado *stripper*. Essa etapa do processo envolve trocadores de calor, temperaturas entre 100° e 140°C e pressões não muito superiores à atmosférica, para que seja feita a dessorção química entre CO_2 e o solvente. Finalizada essa etapa, o solvente, pobre ou ausente de CO_2 , retorna ao sistema absorvedor. Este sistema está representado na Figura 2. Muitas vezes é preciso um tratamento complementar à corrente de solvente para retirar partículas indesejáveis, produtos de corrosão e degradação, garantindo assim, sua integridade e estabilidade (IPCC, 2005).

Figura 2: Esquema de interação entre gás carbônico e solvente.



Fonte: autoria própria.

As taxas de recuperação de CO₂ variam entre 80% e 95% e a escolha exata desse valor é um fator econômico: uma recuperação maior requer um sistema de absorção maior, o que por sua vez, demanda mais energia, o que significa, portanto, aumento de custos (IPCC, 2005).

3.3 Princípios da absorção gasosa

Operações de transferência de massa consistem no estudo de técnicas e equipamentos para separação de componentes de uma mistura ou solução. A absorção é uma das técnicas de separação em que ocorre transferência de massa entre fases. Essa operação unitária tem amplo emprego em indústrias químicas, petroquímicas, indústria de alimentos e controle de poluição. O processo de absorção gasosa consiste na transferência de um componente, denominado soluto, entre fase gasosa e fase líquida. O soluto sai da fase gasosa, alcança a interface gás-líquido e passa para a fase líquida. Essa transferência de massa depende das condições termodinâmicas deste processo. O fluxo também pode ser no sentido inverso, ou seja, um soluto passando da fase líquida para a fase gasosa, mas este fluxo é denominado dessorção (CREMASCO, 2008).

A absorção gasosa é utilizada com diversas finalidades como remoção de contaminantes, impurezas e poluentes. Pode-se utilizar esta operação unitária de formas diversas: todos os componentes da mistura gasosa sendo de interesse, apenas o componente transferido ser o de interesse ou apenas o componente não transferido (SEADER *et al.*, 2011).

Quando um gás entra em contato com um líquido em um recipiente fechado a determinada pressão e temperatura, ocorre transferência de massa da fase gasosa para a fase líquida até que o sistema atinja seu ponto de equilíbrio termodinâmico para aquela condição de temperatura e pressão. A velocidade de absorção de um sistema é determinada pelas suas condições físico-químicas tais como solubilidade, difusividade, cinética da reação, viscosidade e densidade do líquido e pelas condições hidrodinâmicas do sistema como geometria do equipamento e vazão do fluido (SEADER *et al.*, 2011).

Existem dois tipos de absorção: física e química. A absorção física ocorre quando um componente de determinada corrente gasosa possui solubilidade na solução absorvedora, porém não ocorre reação química. Esse tipo de absorção é utilizado para altas concentrações na fase gasosa (superior a 10% em massa) e pressões parciais acima de 1400 kPa. A concentração do soluto na fase líquida é influenciada pela pressão parcial deste componente na fase gasosa. Neste tipo de absorção, o projeto é mais simples do que quando simultaneamente à absorção ocorre reação (WELTY, 2007).

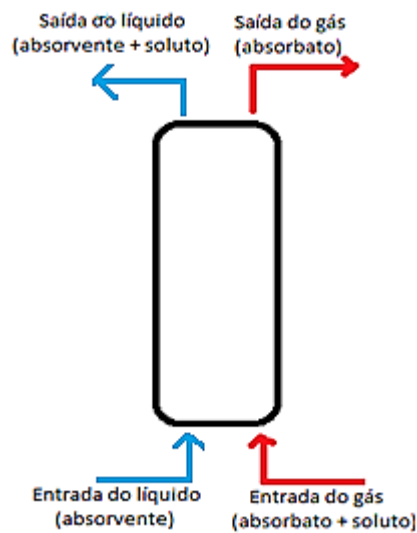
Na absorção química ocorrem ao menos uma reação química entre o soluto presente na fase gasosa e componente(s) da fase líquida. A reação pode ser reversível ou irreversível, quando o produto formado não se decompõe. Reações reversíveis possuem produto formado com ligações fracas. Utiliza-se este tipo de absorção quando a fase gasosa possui baixas concentrações (entre 1 a 10% em massa) e quando necessita-se de um gás purificado. Neste estudo, é necessário considerar simultaneamente as pressões parciais envolvidas (baixas), as velocidades de difusão e de reação química (WELTY, 2007).

A absorção química tem uma maior taxa de absorção e transferência de massa. Isto ocorre devido ao aumento da solubilidade causada pela presença dos reagentes. Além disso, como em qualquer reação química a manipulação de variáveis

do processo, como temperatura, pressão, vazões, influenciam nas taxas de reação. Porém, a absorção química exige informações adicionais e não tem possuí metodologia padrão o que torna este tipo de processo mais caro. (WELTY, 2007)

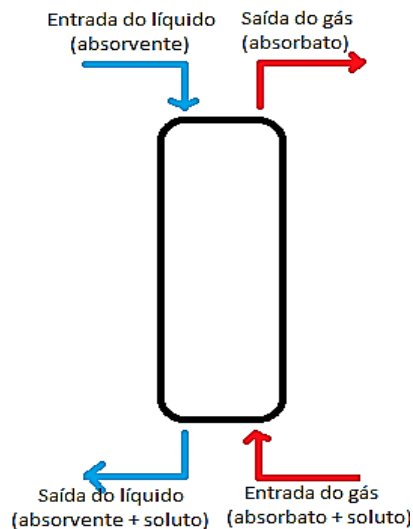
O processo de absorção também pode ser definido de acordo com o sentido do escoamento do gás e do líquido. Na Figura 3 há a representação do fluxo concorrente, em que gás e líquido escoam na mesma direção e sentido. Na Figura 4 têm-se a representação do fluxo em contracorrente, em que gás e líquido escoam na mesma direção, porém em sentidos opostos. (CREMASCO, 2008)

Figura 3: Representação do fluxo em absorção concorrente líquido-gás.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4: Representação do fluxo em absorção contracorrente líquido-gás.



Fonte: Autoria própria.

3.3.1 Soluções utilizadas como solvente em processo de absorção de CO₂

Para realizar a seleção da solução absorvente, Magalhães *et al.* (2004) e Cremasco (2008) sugerem que sejam consideradas as propriedades descritas a seguir:

- Baixo custo;
- Baixa viscosidade para favorecer altos coeficientes de transferência de massa e menores perdas de carga;
- Não deve ser corrosivo para que se evite a necessidade de materiais especiais e caros, além de troca constante de equipamentos;
- Baixa pressão de vapor;
- Não ser tóxico ou inflamável;
- Ser facilmente recuperável por regeneração;
- Não ser espumante.

Os solventes também devem possuir baixa formação de subprodutos/resíduos e baixas taxas de decomposição, o que mantém seu desempenho e estabilidade química. Além disso, a seletividade do solvente é outro fator que deve ser analisado uma vez que a maioria dos gases de combustão contém,

além do CO₂, outros constituintes como NO_x, SO_x e cinzas. Essas substâncias podem interferir no processo de absorção, interagindo quimicamente com o solvente e causando a formação de sais que contaminam a solução e reduzem a eficiência do processo (IPCC, 2005).

Há várias referências em literatura científica relatando o uso de diversas soluções eficientes para a absorção de gás carbônico dentre elas hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH), hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), alcalaminas, entre outros (GONDAL, 2014; HAN *et al.*, 2011).

Soluções absorventes a base de amina, como a monoetanolamina (MEA) e a dietanolamina, vem sendo utilizadas em processos de absorção de gases ácidos como CO₂ e H₂S há mais de 70 anos. No entanto, desde a década de 1990, quando se evidenciou o aumento das emissões do gás carbônico, muitas pesquisas têm sido realizadas a fim de verificar o desempenho, economia e disponibilidade dos processos utilizadores dessas substâncias (HAN *et al.*, 2011).

O MEA, por exemplo, é um dos solventes a base de amina mais empregados em sistemas de captura de CO₂. Devido a sua baixa massa molar e alta alcalinidade, interage forte e rapidamente com o CO₂, sendo capaz de remover grandes porcentagens do gás, mesmo este a baixa concentração, como na maioria das misturas de gases de combustão (KOHL & NIELSEN, 1997; RUBIN *et al.*, 2012).

Segundo Mukherjee *et al.* (2019) o uso de solventes aquosos a base de aminas é uma das tecnologias referência para captura de CO₂, devido à sua alta eficácia de processo, que pode chegar a 98 %. Muito utilizados em refinarias e indústrias a base de carvão e gás natural, esses solventes, no entanto, apresentam algumas desvantagens que limitam sua utilização. Essas substâncias, ao se degradarem, formam compostos que se acumulam em sua fase, interferindo no processo de absorção e, portanto, exigindo uma constante renovação desses reagentes. Além disso, devido a sua volatilidade, esses solventes podem evaporar e serem expelidos junto com o gás de saída após o processo de absorção, sendo, portanto, uma fonte de contaminação ambiental.

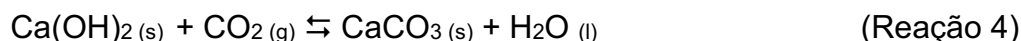
Para Han *et al.* (2011), embora seja muito comercializado para uso em sistemas de sequestro de CO₂, esse tipo de solvente a base de amina pode se degradar, corroer equipamentos e exige alto consumo de energia para sua recuperação. Segundo Kang *et al.* (2018), a regeneração desses solventes demanda cerca de 70 % do total energético requerido no processo de captura e as temperaturas

podem atingir até 120 °C. Toda energia necessária para a regeneração térmica envolve calor sensível e evaporação de água, que são os fatores importantes a serem considerados no projeto e no cálculo de custos.

Diante desse cenário, nas últimas duas décadas, estudos envolvendo a absorção de CO₂ a partir de soluções de hidróxidos de metais alcalinos vêm obtido atenção de pesquisadores (GONDAL, 2014). Soluções de hidróxido de cálcio e hidróxido de sódio, por exemplo, comportam-se como absorventes de CO₂ e apresentam vantagens quando comparadas com soluções a base de amina. Essas duas soluções, por exemplo, possuem menor preço de mercado, menor complexidade de reações químicas e são mais abundantes (YOO *et al.*, 2013; HAN *et al.*, 2011).

3.3.2 Hidróxido de Cálcio

Para Han *et al.* (2011), a absorção de CO₂ pode ocorrer por meio da produção de sais de carbonato insolúveis, utilizando uma solução básica que absorva o poluente, como por exemplo, o Ca(OH)₂. A solução de Ca(OH)₂ destaca-se, pois o seu elemento principal, o cálcio, apresenta baixo valor de mercado, é abundante e não tóxico. Além disso, a precipitação de CaCO₃ por meio da carbonatação de uma solução aquosa de Ca(OH)₂ é uma reação comum na natureza. Segundo esses autores, porém, o uso desse absorvente ainda apresenta duas limitações principais. A primeira é o fato de que para produzi-lo, é necessária grande quantidade de energia, o que, por sua vez, causa queima de combustíveis fósseis, gerando emissão de CO₂. A segunda limitação refere-se à disposição final da grande quantidade de CaCO₃ e água de mistura formados. No entanto, os mesmos autores indicam que há estudos, que buscam fontes alternativas de cálcio e que processos de reciclo podem ser implantados no sistema de captura a fim de reutilizar a água com carbonato produzida.



A reação 4 é termodinamicamente favorável a uma ampla faixa de temperatura que vai de 25 a 750 °C, sendo sua taxa de reação muito rápida em solução aquosa. O CaCO₃ produzido pode ser recuperado em uma extensão limitada ou regenerado para Ca(OH)₂ por calcinação e hidratação (HAN *et al.*, 2011).

Tippayawong & Thanompongchart (2010), utilizaram uma solução de Ca(OH)_2 0,1 M em um sistema de tratamento de biogás utilizando uma coluna recheada. Os resultados obtidos pelos autores constatarem que, após o tratamento com Ca(OH)_2 , a concentração de CO_2 na corrente de biogás foi de 46,8 % para 4 %, o que equivale a uma eficiência superior a 90 %.

Soluções de Ca(OH)_2 , em diferentes concentrações, foram utilizadas como solvente em um estudo baseado no tratamento de biogás, feito por Mel *et al.* (2014). Os autores constatarem que a solução de maior concentração apresentou cerca de 71 % de eficácia de remoção do CO_2 presente no biogás, cuja vazão oscilou entre 0,5 a 1,0 L.min⁻¹ durante o experimento. Rosa (2014) cita o uso de Ca(OH)_2 em processos de absorção de CO_2 , com formação de carbonato de cálcio e posterior regeneração. Conforme mencionado por Dubey *et al.* (2002), uma solução de Ca(OH)_2 pode capturar CO_2 do ar por aproximação, conforme a reação 4, liberando 114 kJ de energia. Esses mesmos autores ainda salientam que a reação de calcinação, descrita pela reação 5, necessária para recuperar o CO_2 , utiliza 179 kJ/mol, uma quantidade energética significativa quando se analisa o volume produzido em um processo.



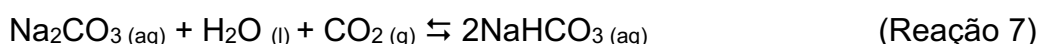
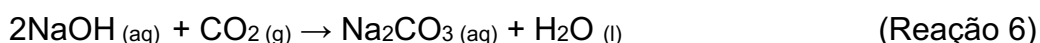
Ha-Duong & Keith (2006) destacam que um sistema de captura de CO_2 , que utiliza Ca(OH)_2 como absorvente é tecnicamente simples e não oferece riscos ao meio ambiente. Nas (1977) afirma que o custo de operação é baixo, porém, destaca que é necessário remover todos os sedimentos e partículas em suspensão para evitar entupimentos nos equipamentos e acessórios que constituem o processo como bombas, bicos de pulverização, tubulação entre outros dispositivos.

Embora muitos trabalhos já evidenciaram o desempenho de soluções aquosas de Ca(OH)_2 como absorvente em sistemas de captura de CO_2 , ainda há escassez de estudos dessa substância em diferentes condições operacionais, como vazão de gás de saída, concentração e pressão parcial de gás carbônico (HAN *et al.*, 2011).

3.3.3 Hidróxido de sódio

Desde a década de 1940, estuda-se a absorção de CO₂ em soluções aquosas de NaOH, porém apenas recentemente esses trabalhos estão focados na redução da emissão desse poluente. Até então, os estudos tinham objetivos acadêmicos como determinar o coeficiente de transferência, taxa de absorção e resistência do filme. Quando comparada com solventes a base de amina, como o MEA, uma solução de NaOH possui maior capacidade de absorção de CO₂, é mais abundante e mais econômica (YOO *et al.*, 2013).

O NaOH pode ser obtido como resíduo e/ou subproduto de diferentes processos, como na indústria cloro-soda e na produção de glifosato. À medida que uma solução aquosa desse solvente entra em contato com o dióxido de carbono em uma corrente de gás, ocorre uma reação de formação de carbonato irreversível (reação 6), seguida de uma reação de formação de bicarbonato reversível (reação 7). Além de oferecer uma rápida absorção, o tratamento com NaOH como absorvente produz o Na₂CO₃, uma substância de interesse comercial, utilizado como matéria-prima na fabricação de cimento e cerâmica (NAS, 1977; SALMÓN *et al.*, 2018; SALMÓN *et al.*, 2017).



Para obter o carbonato de sódio em forma sólida é preciso que a solução aquosa de bicarbonato produzida seja submetida a um processo de cristalização ou secagem. Pesquisas indicam que a forma sólida (pó) desses dois produtos pode ser alcançada usando um *spray dryer* no processo de absorção (YOO *et al.*, 2013; SALMÓN *et al.*, 2017).

Quanto à regeneração da solução absorvente, uma limitação do uso de hidróxido de sódio para sistemas de captura de CO₂ é a demanda energética para a decomposição do Na₂CO₃: para produzir Na₂O, a fonte direta de NaOH, são necessárias temperaturas acima de 800 °C. No entanto, há estudos em literatura científica que mencionam o uso de substâncias como o Na₂O.3TiO₂ ou CaO para diminuir a temperatura de decomposição desse carbonato (YOO *et al.*, 2013). Zeman & Lackner (2004) citam que soluções aquosas de NaOH, diferente de solventes a base

de aminas, não estão sujeitas a perdas oxidativas, o que garante um menor custo de reposição de processo, quando se compara esses dois absorventes

Lasocki *et al.* (2015) efetuaram um tratamento de biogás em escala de laboratório empregando soluções de NaOH de diferentes concentrações (0,3, 0,5 e 1 mol.L⁻¹). Neste trabalho foi utilizado um sistema de borbulhamento e um biogás contendo 44,5 % de CO₂. Os resultados obtidos pelos autores mostram que todas as soluções de NaOH alcançaram índices de remoção maiores que 90 %.

Um sistema de tratamento de biogás empregando uma coluna recheada e uma solução de NaOH 0,1 M foi analisado por Tippayawong & Thanompongchart (2010). A partir dos resultados obtidos, verificou-se que, após o tratamento com NaOH, a concentração de CO₂ na corrente de biogás foi de 46,8% para 3,2 %, o que equivale a uma eficiência superior a 90%.

Analisando o ar atmosférico, Stolaroff *et al.* (2008) afirmam que um sistema de captura de CO₂ deve possuir uma área transversal suficiente para processar grandes volumes de ar. Segundo esses autores, uma fina pulverização de solução de NaOH em uma torre aberta é capaz de produzir uma alta taxa de captura de CO₂, baixa queda de pressão, custo de capital e perda de água reduzidos. No estudo publicado, estimou-se um custo da captura de CO₂ usando um pulverizador de NaOH e excluindo gastos de regeneração da solução e disposição final do CO₂ capturado. Determinou-se um valor de 96 \$ / ton-CO₂ podendo variar de 53 a 127 \$ / tonelada-CO₂.

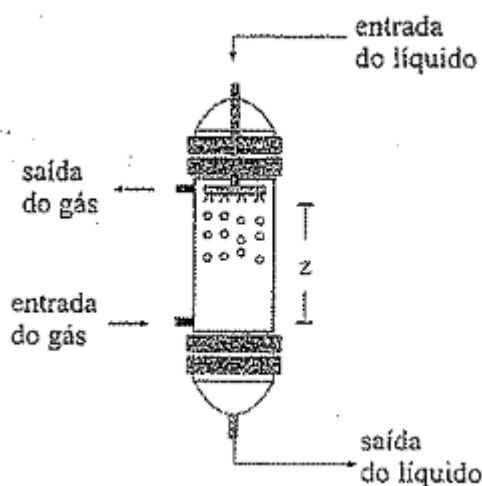
3.4 Equipamentos utilizados para absorção

De acordo com Khol & Nielsen (1997), em um sistema de absorção deve haver um dispositivo que permita uma maior área superficial de contato entre as fases gás e líquida, em circunstâncias que favoreçam o processo de transferência de massa. Dito isso, os principais dispositivos utilizados são as torres de *spray*, torres de borbulhamento e torres de recheios (CREMASCO, 2008). Neste trabalho será utilizada torre de *spray*.

3.4.1 Torres de *Spray*

As torres de *spray* são utilizadas quando a fase gasosa controla o processo de transferência de massa e o gás é altamente solúvel na fase líquida. Neste tipo de absorvedor a fase gasosa, denominada contínua, escoia no equipamento e a líquida é inserida e dispersa por atomizadores na forma de *spray*. Por ser constituída de gotas, a fase líquida é denominada dispersa. Quanto menores forem as gotas maior a área superficial de contato. Contudo, as gotas não devem ser muito pequenas para que não sejam arrastadas pela corrente gasosa. (CREMASCO, 2008).

Figura 5. Esquematização da torre de *spray*.



Fonte: CREMASCO (2008)

Este tipo de absorvedor é muito utilizado em controle de poluição do ar para remoção de diversas substâncias tais com SO_2 , NO_2 e CO_2 . Leilei & Zhao (2012) realizaram estudos com a torre de nebulização e cita como vantagens a alta velocidade relativa entre gás e líquido, grande superfície de contato e dispositivo com estrutura simples.

Um estudo realizado para remoção de amônia em torre de *spray*, relacionou a eficiência do absorvedor com o número de bicos injetores, que são responsáveis por dispersar a fase líquida. O aumento de número de bicos provoca aumento na eficiência do processo, porém causam aumento da queda de pressão do ar quando comparados a absorvedores com um único bico injetor. A utilização de um bico único e maior tem uma menor perda de carga, porém utiliza maior volume de

líquido. Além disso, as gotículas dispersas são maiores diminuindo a superfície de contato e como consequência diminuindo a eficiência. O bico com tamanho pequeno é mais propenso a entupimentos e por isso exige maior manutenção. Em contrapartida, partículas menores fornecem uma maior superfície de contato (MOHAMMAD, 2018).

Este tipo de operação tem baixo custo de manutenção, baixa queda de pressão e uma grande capacidade de processamento. Como desvantagem pode-se citar que apresenta um alto consumo de energia que é utilizada para pulverizar o líquido e eficiências baixas em gases pouco solúveis no líquido de absorção (CODOLO, 2013).

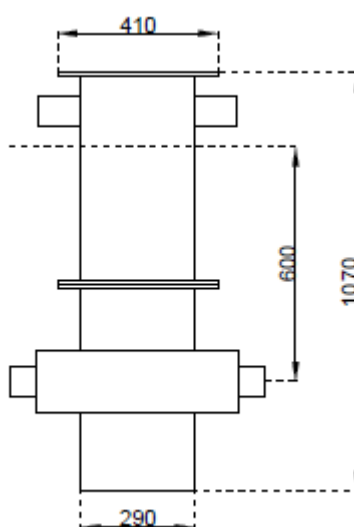
4. Materiais e Métodos

Neste trabalho foi utilizado uma bancada experimental, localizada na Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), Campus Diadema, na Unidade José de Filippi. Após o levantamento dos dados experimentais, avaliou-se a eficiência de remoção de CO₂ e em função da velocidade do gás para duas diferentes vazões de líquido, utilizando solução de hidróxido de cálcio e hidróxido de sódio.

4.1 Bancada Experimental

A bancada experimental utilizada é constituída por uma torre de *spray* fabricada com polipropileno cinza, com diâmetro interno de aproximadamente 290 mm e altura útil para absorção de 600 mm. As duas entradas do gás estão dispostas na parte inferior e as duas saídas do gás na parte superior da torre. Como as entradas do gás são na parte inferior da coluna e a pulverização na parte superior, isso cria um sistema em contracorrente. A Figura 6 demonstra o esquema da torre de *spray* com as respectivas medidas em milímetros.

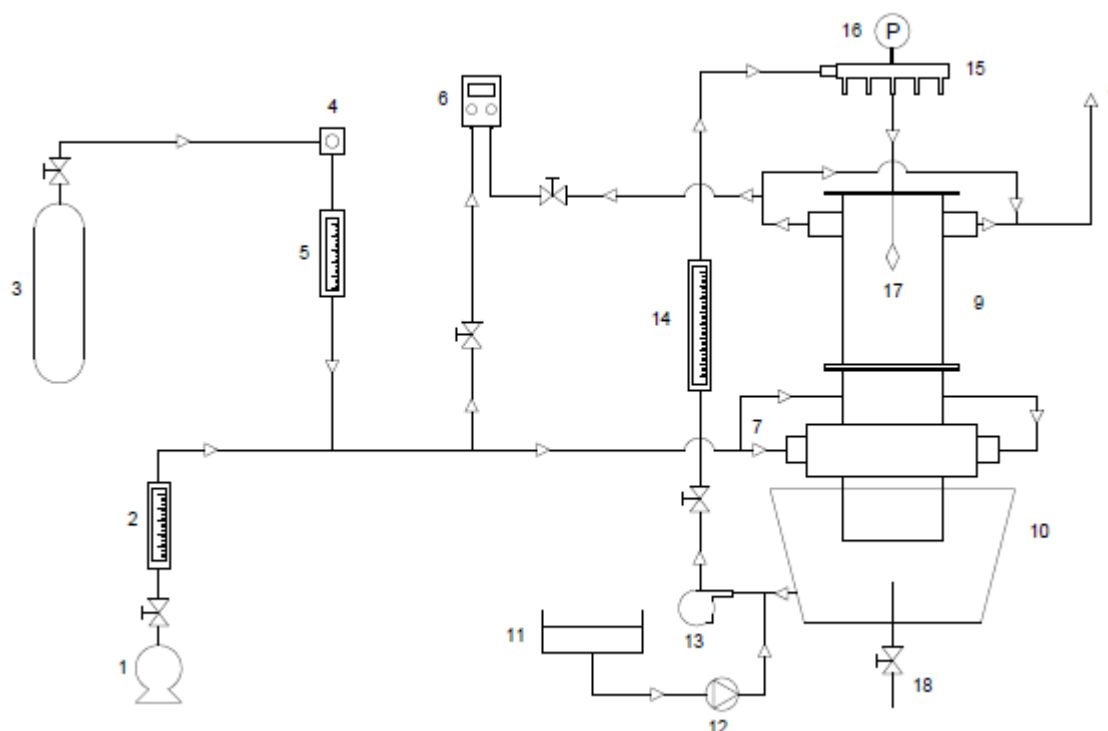
Figura 6: Esquematização da torre de *spray*.



Fonte: Autoria própria.

A bancada também possui uma linha de líquido, para pulverização da solução, um tanque para armazenamento e outro para recirculação dessa solução, uma linha de gás, linha de injeção de dióxido de carbono (CO_2) puro engarrafado, um sistema de exaustão e um analisador de gases, como ilustra a Figura 7. A solução utilizada inicialmente foi a de hidróxido de sódio e posteriormente hidróxido de cálcio.

Figura 7: Esquema da bancada experimental.



Fonte: Autoria própria.

Sendo: (1) ventilador, (2) rotâmetro para ar, (3) cilindro de CO_2 , (4) posto de utilização, (5) rotâmetro para CO_2 , (6) analisador de gases, (7) entradas de gás da torre, (8) saídas de gás da torre, (9) torre de *spray*, (10) tanque de recirculação da solução, (11) tanque de armazenamento de NaOH ou Ca(OH)_2 , (12) bomba peristáltica, (13) bomba centrífuga, (14) rotâmetro para solução, (15) distribuidor de solução, (16) manômetro, (17) bico pulverizador, (18) válvula de drenagem da solução.

O gás utilizado foi composto de ar e CO_2 . Um ventilador promoveu a vazão do ar, em seguida o ar foi contaminado com o dióxido de carbono armazenado no cilindro. Para o controle adequado da quantidade de CO_2 introduzido no sistema, foi

necessária a utilização de uma válvula agulha, enquanto um rotâmetro indicava a vazão de CO₂.

Antes de entrar na torre, uma amostra de gás (Ar + CO₂) era coletada e seguia para o analisador de gases (HORIBA PG250), para a medição da concentração de CO₂ presente na linha de gás. A medição no analisador é feita em % em volume e a faixa de medição é de 0 a 5 %. Na saída da coluna há outro ponto de coleta onde foi feita uma nova medição da concentração do CO₂, a fim de se calcular a eficiência de remoção desse contaminante após o processo de absorção. A saída da torre foi acoplada a um sistema de exaustão para dispersão do residual de dióxido de carbono presente no gás.

O analisador de gases HORIBA PG250 tem um tempo de resposta mínimo para cada análise de concentração do CO₂. Desse modo, foi considerado um tempo inicial de 3 minutos para o início da medição. Tanto na entrada como na saída foram realizadas 5 medições, a primeira após 3 minutos, seguida de 4 medições no intervalo de 30 segundos. As medições de concentração na entrada e na saída da torre foram realizadas para todas as condições de operação.

Os bicos pulverizadores foram fixados na tampa do equipamento, que fica localizada no topo da coluna. Os bicos são da *Spraying Systems Co*, do tipo cone cheio com os diâmetros de orifício (D_o) de 1,6 mm e com abertura de 15°, o menor ângulo e menores diâmetros de orifício disponíveis para as condições experimentais desse trabalho, segundo o catálogo do fabricante. Selecionou-se este modelo de bico para minimizar a formação do filme de líquido, uma vez que quanto maior o ângulo maior é o contato das gotas com a parede da torre. Com a intenção de ter a maior superfície interfacial possível para transferência de massa, o bico pulverizador do tipo cone cheio foi escolhido por produzir uma distribuição mais uniforme de gotas por todo volume da coluna. A Figura 8 mostra um bico pulverizador do tipo cone cheio.

Figura 8: Bico pulverizador utilizado na bancada experimental.



Fonte: Autoria própria.

Uma bomba centrífuga promoveu o escoamento do líquido, impulsionando a solução do tanque de armazenamento até os bicos pulverizadores. Utilizou-se, também, um rotâmetro para verificação da vazão de líquido, uma válvula para regular a vazão e um manômetro para medir a pressão.

A solução de absorção (solução aquosa de NaOH e posteriormente de Ca(OH)_2) foi injetada por uma bomba peristáltica diretamente na linha de líquido, garantindo um excesso de 20% de NaOH acima da concentração calculada (estequiométrica), para garantir que a reação entre o CO_2 e os hidróxidos utilizados ocorresse.

As soluções utilizadas foram mantidas no tanque de recirculação durante os experimentos. Esse tanque foi posicionado logo abaixo da entrada de gás da torre, para poder captar a solução utilizada dentro da coluna para recirculação. A velocidade do gás na entrada da torre de *spray* utilizada nesse estudo variou entre 0,05 m/s a 0,15 m/s, que corresponde às vazões de 12 m³/h, 22 m³/h e 34 m³/h. Para cada uma dessas vazões de gás foi necessário calcular a quantidade de NaOH e Ca(OH)_2 necessária para a absorção do CO_2 . Sabendo que, cada mol de CO_2 consumido para formar 1 mol de Na_2CO_3 , são precisos 2 mols de NaOH. Para solução de Ca(OH)_2 , por sua vez, a proporção da reação entre CO_2 e Ca(OH)_2 é de 1:1. Nas duas reações os hidróxidos foram utilizados com 20 % em excesso para garantir que todo CO_2 reaja. Nas Tabela 3 e Tabela 4, considerando a concentração de CO_2 sendo de 1000 ppm, estão os valores calculados para as duas soluções estudadas de acordo com a

estequiometria das reações. Para cada vazão de ar é necessária determinada vazão de CO_2 para atingir a concentração desejada. Além disso, de acordo com as reações 4 e 6 é necessário calcular a vazão de NaOH e $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Para estes cálculos foram utilizados a massa molar de CO_2 , 44g/mol, a massa molar de NaOH, 40g/mol, e a massa molar de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 74g/mol.

Tabela 3: Cálculos realizados para absorção com solução de hidróxido de sódio.

Vazão Volumétrica de Ar [m^3/h]	Vazão Volumétrica de CO_2 [m^3/h]	Vazão Molar de CO_2 [mol/h]	Vazão Molar de NaOH [mol/h]
12,00	0,012	0,73	1,45
22,00	0,022	1,33	2,67
34,00	0,034	2,06	4,12

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4: Cálculos realizados para absorção com solução de hidróxido de cálcio.

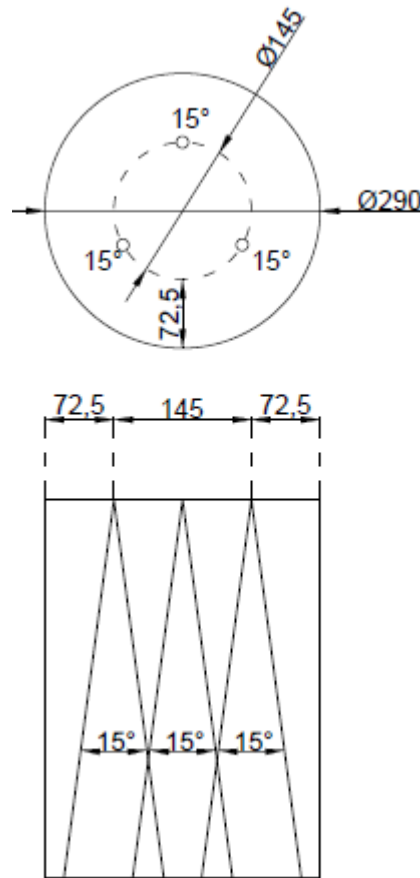
Vazão Volumétrica de Ar [m^3/h]	Vazão Volumétrica de CO_2 [m^3/h]	Vazão Molar de CO_2 [mol/h]	Vazão Molar de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [mol/h]
12,00	0,012	0,73	0,73
22,00	0,022	1,33	1,33
34,00	0,034	2,06	2,06

Fonte: Autoria própria.

Para o estudo da solução de NaOH foram utilizadas duas vazões de líquido distintas: 200 e 400L/h. Para a solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, por sua vez, foram utilizadas três vazões: 200, 400 e 500L/h. Neste trabalho utilizou-se uma configuração com 3 bicos pulverizadores de 1,6 mm de diâmetro de orifício.

Na Figura 9 é demonstrada a configuração utilizada no experimento com três bicos pulverizadores.

Figura 9: Configurações dos bicos pulverizadores utilizados na torre de *spray*.



Fonte: Autoria própria.

As medidas de concentração de gás carbônico na entrada e na saída foram medidas em %(v) e em seguida transformada em ppm para os cálculos.

A avaliação da eficiência de remoção do CO₂ foi calculada por meio da Equação 1.

$$Eficiência (\%) = \left(\frac{C_{A,E} - C_{A,S}}{C_{A,E}} \right) * 100 \quad (1)$$

Em que $C_{A,E}$ e $C_{A,S}$ são, respectivamente, as concentrações de entrada e saída do poluente [ppm].

Outra grandeza que pode ser utilizada para comparação das soluções é a relação L/G, que nada mais é do que a razão entre a vazão de líquido L em L/h e a vazão de gás G em m³/h. A relação L/G apresentada em L/m³ foi calculada pela equação 2:

$$Relação L/G = \frac{Vazão de Líquido}{Vazão de Gás} \quad (2)$$

5. Resultados e discussão

Foi possível avaliar a influência da velocidade do gás na eficiência de remoção de CO₂. Além disso, avaliou-se a influência da solução de absorção no processo de remoção de CO₂.

Conforme descrito anteriormente foram utilizadas três vazões de gás para realizar os experimentos. Considerando que o diâmetro da seção transversal é de 0,29 m, pode-se calcular as respectivas velocidades e os valores estão apostos na Tabela 5.

Tabela 5: Dados de vazão de gás (Qg) e cálculos das respectivas velocidades.

Qg (m³/h)	D (m)	A(m²)	V(m/s)
12	0,29	0,066	0,0504
22	0,29	0,066	0,0925
34	0,29	0,066	0,1430

Fonte: autoria própria.

Na Tabela 6 estão os dados de concentração de gás carbônico em ppm na entrada e na saída e as respectivas vazões de líquido utilizadas para a solução de NaOH. Na Tabela 7 estão apostos os mesmos dados para a solução de Ca(OH)₂. As medições foram realizadas cinco vezes para calcular média e desvio padrão dos dados aferidos. As medidas de concentração na entrada e na saída foram coletadas em %(v) e transformadas em ppm. A medição se deu na faixa de 0,07 % a 0,15 % que representa, respectivamente, 700 a 1500 ppm.

Tabela 6: Dados obtidos para absorção de gás carbônico utilizando solução de hidróxido de sódio.

Solução NaOH											
Concentração de CO ₂											
Vazão de gás (m³/h)	Vazão de líquido (l/h)	Entrada 1 (ppm)	Saída 1 (ppm)	Entrada 2 (ppm)	Saída 2 (ppm)	Entrada 3 (ppm)	Saída 3 (ppm)	Entrada 4 (ppm)	Saída 4 (ppm)	Entrada 5 (ppm)	Saída 5 (ppm)
12	200	1000	800	1000	800	1000	800	1000	800	1000	800
	400	1000	700	1000	700	1000	700	1000	700	1000	700

22	200	1400	1300	1400	1300	1400	1300	1400	1300	1400	1300
	400	1400	1200	1400	1200	1400	1200	1400	1200	1400	1200
34	200	1300	1200	1300	1200	1300	1200	1300	1200	1300	1200
	400	1300	1200	1300	1200	1300	1200	1300	1200	1300	1200

Fonte: autoria própria.

Tabela 7: Dados obtidos para absorção de gás carbônico utilizando solução de hidróxido de cálcio.

Solução Ca(OH)₂											
Concentração de CO₂											
Vazão de gás (m³/h)	Vazão de líquido (l/h)	Entrada 1 (ppm)	Saída 1 (ppm)	Entrada 2 (ppm)	Saída 2 (ppm)	Entrada 3 (ppm)	Saída 3 (ppm)	Entrada 4 (ppm)	Saída 4 (ppm)	Entrada 5 (ppm)	Saída 5 (ppm)
12	200	1500	1300	1500	1300	1500	1300	1500	1300	1500	1300
	400	1500	1300	1500	1300	1500	1300	1500	1300	1500	1300
	500	1500	1200	1500	1200	1500	1200	1500	1200	1500	1200
22	200	1100	1000	1100	1000	1100	1000	1100	1000	1100	1000
	400	1100	1000	1100	1000	1100	1000	1100	1000	1100	1000
	500	1100	900	1100	900	1100	900	1100	900	1100	900
34	200	1200	1100	1200	1100	1200	1100	1200	1100	1200	1100
	400	1200	1100	1200	1100	1200	1100	1200	1100	1200	1100
	500	1200	1000	1200	1000	1200	1000	1200	1000	1200	1000

Fonte: autoria própria.

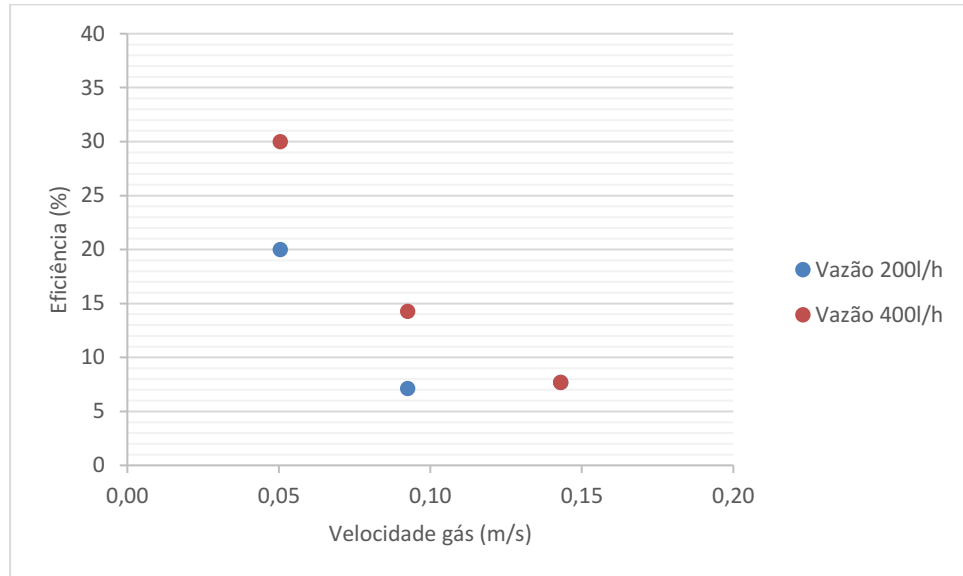
Pode-se notar que, embora tenham ocorrido 5 medições para os cálculos de média e desvio padrão, os dados não sofreram alterações. Isso pode ser explicado pelo fato de que o analisador utilizado apresenta o resultado em percentual de CO₂, apresentando o resultado na forma 0,00% com duas casas decimais. Isso fez com que as medições não apresentassem variação, gerando certa imprecisão nos resultados.

Utilizando os dados coletados experimentalmente pode-se calcular a eficiência em cada condição de vazão de líquido e de gás estudadas utilizando a equação 1.

Nas figuras Figura 10 e Figura 11 estão dispostos os dados coletados, respectivamente, para o hidróxido de sódio e para o hidróxido de cálcio. Nestas figuras

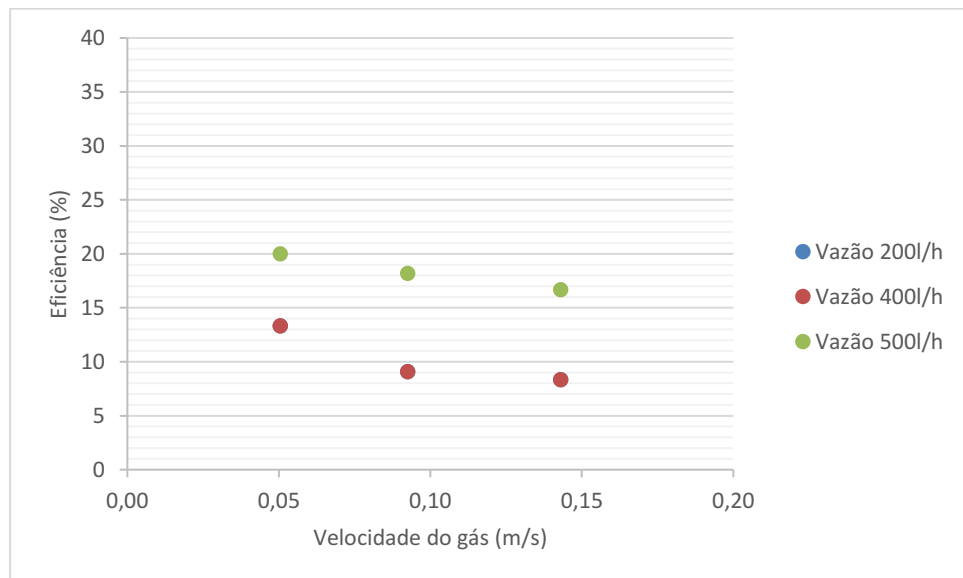
pode-se avaliar a influência da variação da velocidade do gás e da vazão de líquido na eficiência.

Figura 10: Eficiência NaOH variando velocidade e vazão.



Fonte: autoria própria.

Figura 11: Eficiência Ca(OH)_2 variando velocidade do gás e vazão de líquido.



Fonte: autoria própria.

De início seriam utilizadas duas vazões de líquido, 200 L/h e 400 L/h, porém como os dados obtidos para vazão de 400 L/h apresentaram baixa eficiência para solução de hidróxido de cálcio foi feito mais uma série de experimentos utilizando vazão de líquido de 500 L/h apenas para esta solução. A eficiência observada

utilizando a solução de hidróxido de cálcio foi coincidente para as vazões de 200 L/h e 400 L/h conforme pode ser observado na Tabela 7. Na Figura 11, os pontos azuis e vermelhos são coincidentes e por isso não é possível verificar as duas vazões separadamente.

Nas Figura 10 e Figura 11 pode-se notar que com o aumento da velocidade do gás ocorre uma redução de eficiência. Esta correlação pode ser atribuída ao fato de que com o aumento da velocidade do gás, o gás carbônico fica menos tempo na coluna de absorção, ou seja, tem menos tempo de contato com a solução estudada, o que afeta diretamente a eficiência.

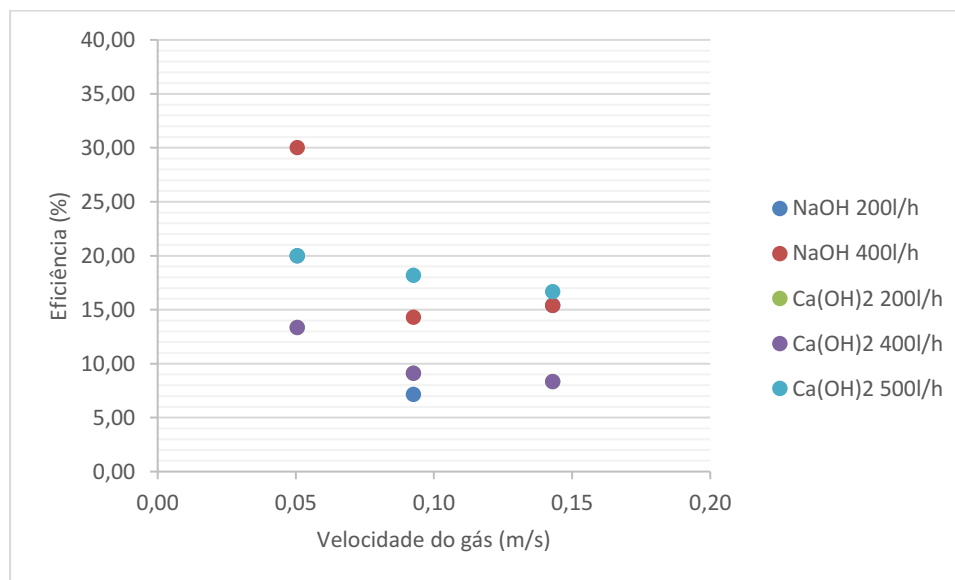
Zhenqi *et al.* (2009) estudaram a absorção de gás carbônico utilizando solução de hidróxido de sódio alterando as variáveis do processo. Pôde-se verificar que o aumento da vazão de gás tem um efeito notável sobre a eficiência de remoção de gás carbônico, a eficiência diminui com o aumento da vazão de gás. Os autores atribuíram isto ao fato de o tempo disponível para a reação entre CO_2 e NaOH ser insuficiente já que ocorre um aumento da velocidade do gás carbônico e o tempo de contato com a solução de NaOH diminui, reduzindo a eficiência de absorção. Este comportamento está de acordo com os dados experimentais que também demonstram, para as duas soluções, uma redução na eficiência quando se aumenta a vazão de gás.

Além disso, pode-se notar nas figuras 10 e 11 que a relação entre vazão de líquido e eficiência é proporcional, ou seja, com o aumento da vazão do líquido pode-se observar graficamente o aumento da eficiência. O aumento da vazão de líquido aumenta a área interfacial de gotas, desse modo há maior área disponível para a transferência de massa. O aumento da vazão também aumenta a pressão de pulverização, o que diminui o diâmetro de gota e aumenta a área interfacial.

Zhenqi *et al.* (2009) em seu estudo utilizando solução de NaOH para remoção de dióxido de carbono obtiveram valores significativos de eficiência. Os resultados demonstraram que a eficiência de remoção aumenta quando a vazão de líquido é aumentada, este mesmo comportamento foi observado na Figura 10 e Figura 11 .

Na Figura 12 estão dispostos graficamente todos os dados coletados, tanto para a solução de hidróxido de sódio, quanto para a solução de hidróxido de cálcio variando a velocidade do gás e da vazão de líquido.

Figura 12: Eficiência versus velocidade do gás para NaOH e Ca(OH)_2 em diferentes vazões.



Fonte: autoria própria.

Na figura 12 pode-se observar que a solução de hidróxido de sódio teve uma eficiência superior à solução de hidróxido de cálcio para todas as condições de operação analisadas. Para a solução de NaOH a eficiência obtida ficou na faixa de 7 a 30 %, enquanto que para a solução de Ca(OH)_2 a eficiência se deu entre 9 e 20 %. O NaOH apresentou uma eficiência 10 % superior ao Ca(OH)_2 . Para a solução de hidróxido de sódio a melhor eficiência obtida foi com a utilização de vazão de gás a 12 m³/h e de líquido a 400 L/h. Para a solução de hidróxido de cálcio, por sua vez, a melhor eficiência foi obtida com vazão de gás a 12 m³/h e vazão de líquido a 500 L/h. Ressalta-se que para esta solução os resultados obtidos com vazão de líquido a 200 L/h e 400 L/h foram coincidentes.

Jyh *et al.* (2004) realizaram pesquisas com diversas soluções absorvedoras utilizando uma torre de *spray* com objetivo de absorver gás carbônico. Utilizando-se solução de hidróxido de cálcio sem adição de outros componentes relatou que a eficiência de remoção de gás carbônico foi baixa e irregular o que corrobora com os dados experimentais que obteve eficiências menores para a solução de hidróxido de cálcio.

Han *et al.* (2011) estudaram o desempenho da solução de hidróxido de cálcio na captura de CO₂. Nos estudos, concluiu-se que a concentração de Ca(OH)₂ na solução afetou fortemente a eficiência de remoção. O excesso de composto não dissolvido, que existia em suspensão, reduziu a absorção de CO₂ o que foi atribuído principalmente ao efeito de dissolução simultânea de Ca(OH)₂ e produção de carbonato de cálcio (CaCO₃), o que dificulta a associação entre Ca²⁺ e CO₃²⁻ na suspensão. Ou seja, uma concentração maior de Ca(OH)₂ reduziu a capacidade de absorção da solução e produz carbonato de cálcio, aglomerado com baixa cristalinidade. A maior eficiência de remoção de dióxido de carbono foi de 32,17% utilizando solução saturada de hidróxido de cálcio. Portanto, pode-se atribuir a menor eficiência da solução de Ca(OH)₂ quando comparada à solução de NaOH ao comportamento descrito pelos autores.

Comparando os dados obtidos com o trabalho de Zhenqi *et al.* (2009), os quais tiveram resultados de eficiência que chegam a valores de 91,7 % para solução de NaOH utilizando vazão de líquido de 12 L/h, vazão de gás de 0,456 m³/h, CO₂ a 15 % e NaOH a 5 %, pode-se concluir que a eficiência obtida, que chegou a 30 % neste estudo, foi relativamente baixa para solução de hidróxido de sódio.

Srichat *et al.* (2017) elaboraram um sistema de purificação de biogás utilizando uma torre de absorção e Ca(OH)₂ como solução absorvente, variando vazões de gás e líquido e concentração. Nos resultados obtidos, os maiores valores de eficiência de remoção de CO₂ foram alcançados quando se aplicou a solução mais concentrada sob maior vazão, enquanto a vazão de biogás era baixa. Os autores concluíram que quanto mais contato a fase líquida tiver com fase gasosa, maior será o grau de absorção do processo e obtiveram eficiência de 42% com CO₂ a 39,36%, vazão de gás de 0,3 m³/h, vazão de líquido a 1800 L/h e Ca(OH)₂ a 0,2M. Pode-se aferir que os valores de eficiência, que variaram entre 8% e 20%, obtidos foram baixos.

Para comparar as soluções deste trabalho com as da literatura, os dados foram compilados na Tabela 8 para melhor visualização.

Tabela 8: Comparação das vazões de líquido, gás e eficiência para cada solução.

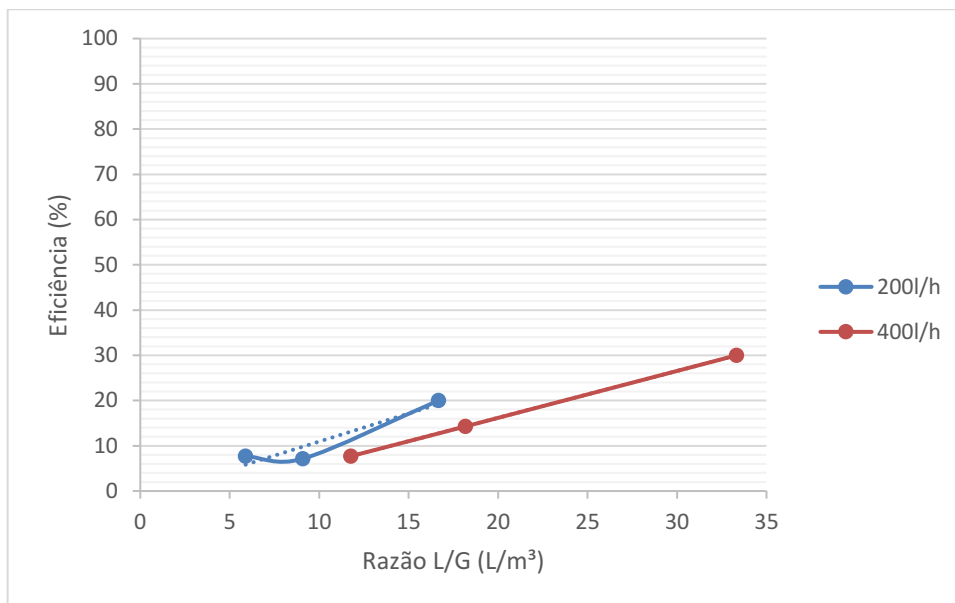
Solução	Vazão de líquido (L/h)	Vazão de gás (m³/h)	Eficiência (%)
NaOH experimento	400,00	12,00	30,00
NaOH (Zhenqi <i>et al.</i> (2009))	12,00	0,46	91,70
Ca(OH) ₂ experimento	500,00	12,00	20,00
Ca(OH) ₂ (Srichat <i>et al.</i> (2017))	1800,00	0,30	42,00
Ca(OH) ₂ (Jyh <i>et al.</i> (2004))	1,86	0,66	< 12 %

Fonte: autoria própria.

A eficiência baixa obtida no processo, tanto para solução de NaOH quanto para solução de Ca(OH)₂, pode ser explicada pela altura da torre de *spray* que é crucial no processo de absorção. Quanto mais alta maior o tempo de contato do gás com o líquido e, portanto, maior a eficiência obtida. Como a torre utilizada era relativamente curta, a eficiência do processo foi prejudicada.

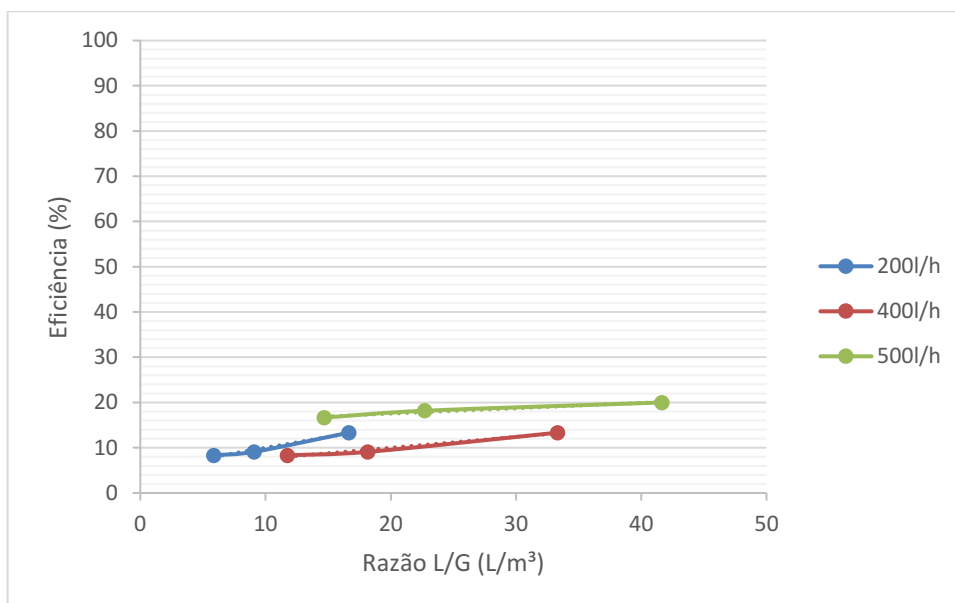
Foram também estudados a razão de vazão de líquido e de gás descrita pela equação 2 e sua influência na eficiência de remoção de gás carbônico. Dividindo essas duas vazões obtém-se a razão L/G. Nas Figura 13 Figura 14 estão dispostos os dados obtidos experimentalmente de L/G e eficiência para, respectivamente, a solução de hidróxido de sódio e de hidróxido de cálcio.

Figura 13: Razão L/G e eficiência para a solução de NaOH estudada.



Fonte: autoria própria.

Figura 14: Razão L/G e eficiência para a solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ estudada.



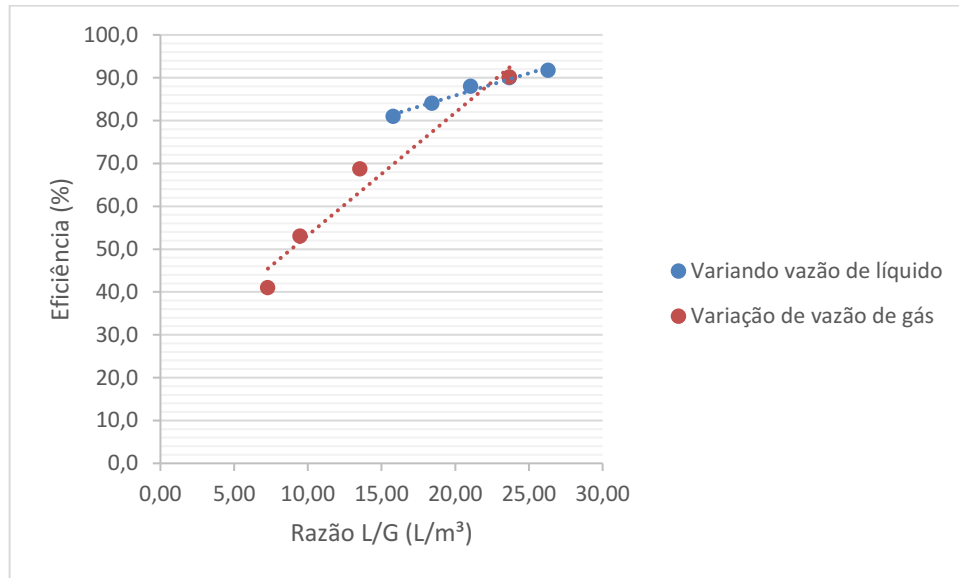
Fonte: autoria própria.

Pode-se notar nas figuras 13 e 14 que o aumento na relação L/G provocou um aumento na eficiência de remoção de carbono em todas as condições de operação estudadas, o que era esperado, pois o aumento da vazão de líquido aumenta a eficiência de remoção para uma determinada vazão de gás.

Na Figura 15 têm-se os dados obtidos por Zhenqi *et al.* (2009) em seu estudo com solução de NaOH. Eles realizaram o experimento fixando vazão de líquido

e variando apenas a de gás e, posteriormente, fixando a vazão de gás e variando apenas a de líquido. Os valores da relação L/G e eficiência estão dispostos na Figura 15.

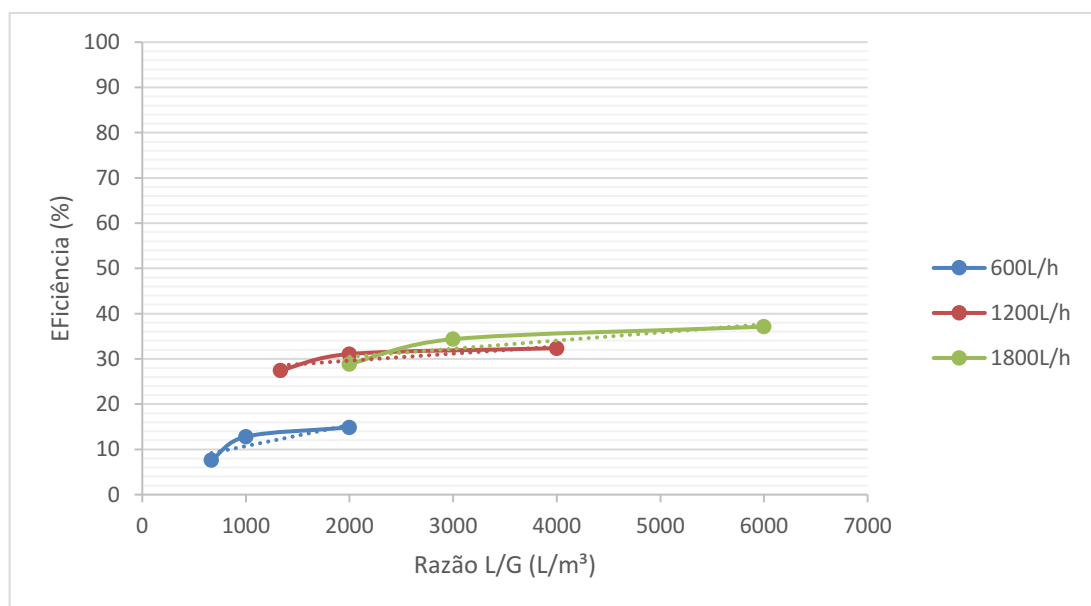
Figura 15: Razão L/G e eficiência obtidos por Zhenqi et al. (2009) em seu estudo com NaOH.



Fonte: autoria própria.

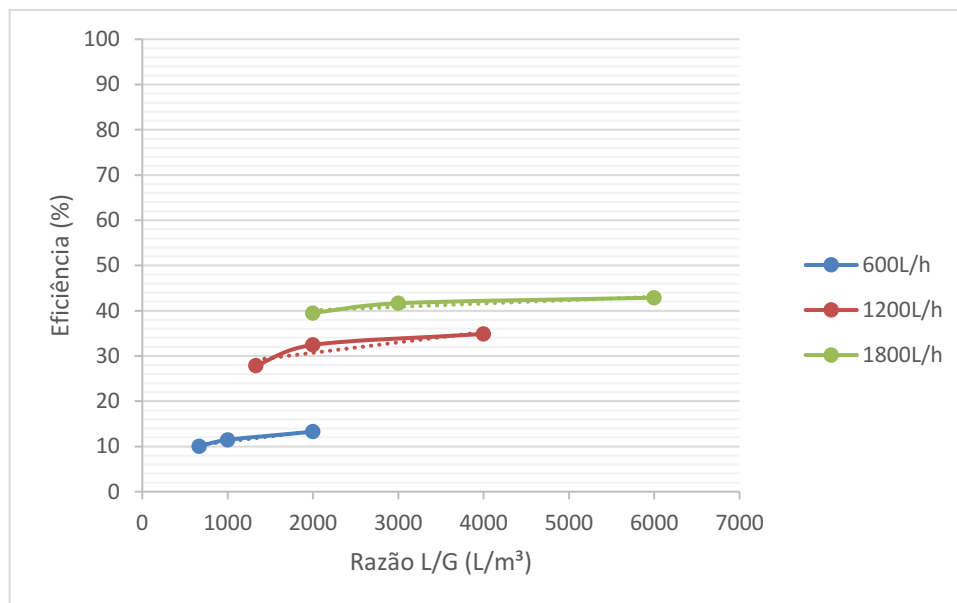
Nas Figura 16 e Figura 17 estão, respectivamente, os dados experimentais obtidos por Srichat *et al.* (2017) em seu estudo com solução de hidróxido de cálcio a 0,1M e 0,2M.

Figura 16: Razão L/G e eficiência obtidos por Srichat et al. (2017) para a solução de Ca(OH)_2 0,1M.



Fonte: autoria própria.

Figura 17: Razão L/G e eficiência obtidos por Srichat et al. (2017) para a solução de Ca(OH)_2 0,2M.



Fonte: autoria própria.

Pode-se notar que os dados obtidos neste estudo seguem os de Zhenqi *et al.* (2009) e Srichat *et al.* (2017), que obtiveram também eficiência crescente com o aumento da relação L/G, exceto para valores altos de vazão de líquido na solução de hidróxido de cálcio que teve eficiência praticamente constante com o aumento da razão L/G. Embora nenhum dos estudos sobre remoção de gás carbônico tenha analisado esse parâmetro, pode-se notar uma importante relação entre eficiência e as razões entre vazões de líquido e gás. De maneira geral, quanto maior o valor da relação L/G, maior a eficiência alcançada.

Em seu sistema utilizando um atomizador, JHY *et al.* (2004) controlaram a relação L/G no valor de 2,82 L/m³ durante todo o processo. Utilizando uma torre de *spray* de 10 cm de diâmetro interno e 70 cm de altura, os autores avaliaram a eficiência de remoção de CO_2 utilizando solução de Ca(OH)_2 5% em diferentes temperaturas e concentrações de gás de entrada. No geral, a eficiência de remoção obtida foi baixa (abaixo de 10 %, com picos de 12%) e irregular.

Em suma, para a solução de hidróxido de sódio a eficiência obtida neste trabalho ficou entre 7 e 30% e a relação L/G ficou na faixa de 5,88 a 18,18 l/m³, para

esta solução os valores de L/G utilizados foram próximos aos utilizados pela literatura, então atribui-se o fato de a eficiência ter sido menor a altura da torre ter sido baixa. Já para a solução de hidróxido de cálcio a eficiência obtida ficou entre 9 e 20% e a relação L/G ficou na faixa de 8,33 a 18,18l/m³ para esta solução a eficiência também foi inferior as da literatura, o que pode ser explicado pelos valores utilizados de L/G terem sido menores dos que os utilizados e pela altura insuficiente da torre. Ocorre uma relação entre a relação L/G e eficiência de remoção, o que justifica que para valores baixos de L/G se obtenha eficiências baixas.

A altura da torre influencia diretamente na eficiência do processo de absorção e , no sistema montado, não era possível manusear esse parâmetro para verificar a eficiência em outros valores de altura. Além disso, na literatura consultada, a maioria dos autores não informou o a altura de seus sistemas para que fosse feita uma análise comparativa com o trabalho aqui apresentado.

6. Conclusão

Os resultados experimentais apresentaram as mesmas relações com o encontrado na literatura, ou seja, a influência de parâmetros como velocidade de gás e vazão de líquido afetou a eficiência da forma esperada (aumento ou diminuição). Pode-se notar a influência da solução utilizada, da vazão de gás e da vazão de líquido na eficiência de absorção de gás carbônico. Conforme esperado, a eficiência de remoção de gás carbônico para a solução de hidróxido de sódio foi superior à da solução de hidróxido de cálcio devido as estruturas formadas após absorção de cada um destes compostos. Quanto a relação entre a vazão de gás e a eficiência pode-se notar que o aumento deste parâmetro reduziu a eficiência de remoção de CO₂, o que pode ser explicado pelo menor tempo de contato entre o gás carbônico e a solução. A eficiência, porém, aumenta com o aumento da vazão do líquido. Justamente por diminuir o tempo disponível para a reação entre o composto utilizado (hidróxido de sódio ou hidróxido de cálcio) e o gás carbônico.

Pode-se observar, também, a relação entre eficiência e relação L/G. O aumento desta razão melhora a eficiência de remoção do processo. A eficiência de

remoção obtida para a solução de hidróxido de sódio ficou entre 7 e 30% e a relação L/G ficou na faixa de 5,88 a 18,18l/m³. Já para a solução de hidróxido de cálcio a eficiência obtida ficou entre 9 e 20% e a relação L/G ficou na faixa de 8,33 a 18,18l/m³. Para a solução de hidróxido de cálcio, pode-se relacionar o fato de a eficiência obtida ser inferior à literatura com o fato de que o L/G utilizado também foi significativamente inferior.

A eficiência do processo de remoção de CO₂ obteve resultados inferiores aos encontrados na literatura. Para melhorar e equiparar os resultados obtidos sugere-se a utilização de uma coluna mais alta, visto que, isso possibilitaria maior tempo de contato entre a solução e o gás, permitindo que o processo tenha uma maior eficiência. Além disso, poderia trabalhar com maior concentração de reagente, para avaliar a influência deste na eficiência de remoção, assim como aumentar a relação L/G do processo.

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se alterar parâmetros como altura da coluna, concentração de absorvente e de gás carbônico, razão L/G e verificar sua influência na eficiência. Além disso pode-se estudar o custo-benefício de cada solução, relacionando a eficiência com o preço.

Bibliografia

ANDRIANI, D.; WRESTA, A.; ATMAJA, T. D.; SAEPUDIN, A. A Review on Optimization Production and Upgrading Biogas through CO₂ Removal Using Various Techniques. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v.172, p.1909-1928, 2014.

BGS (BRITISH GEOLOGICAL SURVEY). Man-made (anthropogenic) greenhouse gases. Disponível em: <<https://www.bgs.ac.uk/discoveringGeology/climateChange/CCS/Anthropogenic.html>>. Acesso em 28 abr. 2020.

CARVALHO, D. F. Hidrogenação catalítica de dióxido de carbono (CO₂) para síntese de metanol e dimetiléter utilizando catalisador sólido bifuncional. RIO DE JANEIRO/RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos). 2018. 90p.

CARVALHO, L. S.; NEVES, S. B.; LIMA, Y.; DUARTE, I. R. C.; TEIXEIRA, W. D.; SANTANA, M. L.; FERRARI, A. M. A. Estudo da tecnologia de separação do CO₂ de gases industriais por absorção com monoetanolamina-MEA. In: Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 4., 2007, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas: UNICAMP, 2007.

CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). Ficha. Ficha de informação de produto químico: Dióxido de carbono. Disponível em: <https://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=DI%20D3XIDO%20DE%20CARBONO>. Acesso em 13 ago. 2020.

CODOLO, M. C.; BIZZO, W. A.; Experimental study of SO₂ removal efficiency and volumetric mass transfer coefficients in a pilot-scale multi-nozzle spray tower. Elsevier, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 66, November 2013, Pages 80-89.

COUTO, I. C. P.; COUTO, S. C. P.; JUNIOR, E. N. O. Estudo de uma coluna de absorção de dióxido de carbono em solução de hidróxido de sódio. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 20, 2014, Florianópolis. Canais eletrônicos...Florianópolis: UFSC, 2014.

CREMASCO, M. A. Fundamentos de transferência de massa. 2 ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

DUBEY, M. K.; ZIOCK, H.; RUEFF, G.; ELLIOTT, S.; SMITH, W. S.; LACKNER, K. S.; JOHNSTON, N. A. Extraction of carbon dioxide from the atmosphere through engineered chemical sinkage. Fuel Chemistry Division Preprints, 47(1), p. 81- 84, 2002.

EIBEL, E.; PINHEIRO, R. B. M. Estudo de caso: Crédito de carbono. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, Florianópolis, v. 4, n. 2, p. 588– 601, out. 2015/mar. 2016.

EPA (United States Environmental Protection Agency). Greenhouse Gas Emissions: Overview of Greenhouse Gases. 2020. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>>. Acesso em 28 abr. 2020.

GLOBAL CARBON ATLAS. CO₂ emissions. 2020 Disponível em: <<http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>>. Acesso em 28 abr. 2020.

GONDAL, S. Carbon dioxide absorption into hydroxide and carbonate systems. TRONDHEIM/NORUEGA: Norwegian University of Science and Technology. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Out/2014. 133p.

HA-DUONG, M.; KEITH, D. W. Climate strategy with CO₂ capture from the air. Climatic change 74 (1-3), 2006. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/200736454_Climate_Strategy_with_Co2_Capture_from_the_Air>. Acesso em 13 jul. 2020.

HAN, SANG-JUN; YOO, MIRAN; KIM, DONG-WOO; WEE, JUNG-HO. Carbon dioxide capture using calcium hydroxide aqueous solution as the absorbent. Revista Energy and Fuels, v. 25, p. 3825–3834, 2011.

IEA (International Energy Agency). Data and Statistics. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2%20emissions%20by%20sector>>. Acesso em 28 abr. 2020.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Canada: Cambridge University, 2005.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Canada: Friesens, 2007.

JI MIN KANG, J. M.; MURNANDARI, A.; YOUN, M. Y.; LEE, W.; PARK, K. T.; KIM, Y. E.; KIM, J. H.; KANG, S; LEE, J.; JEONG, S. K. Energy-efficient chemical regeneration

of AMP using calcium hydroxide for operating carbon dioxide capture process. Chemical Engineering Journal, 335, 2018, p. 338– 344.

JYH-CHERNG CHEN, GUOR-CHENG FANG, JUN-TIAN TANG, LI-PING LIU. Removal of carbon dioxide by a spray dryer, Chemosphere, Volume 59, Issue 1, 2005, Pages 99-105, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.09.076>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653504008732>. Acesso em 23/01/2021.

JÚNIOR, A. C. S.; ANDRADE, J. C. S.; TELÉSFORO, A. C. O; FARIAS, L. G. Q.; SOUZA, A. L. R.; GÓES, M. F. B. Políticas Públicas, Tecnologias mais Limpas e Desenvolvimento Sustentável: um Estudo de Projetos de MDL em Parques Eólicos no Brasil. In: Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração, Rio de Janeiro, 34., 2010.

KANNICHE, M.; GROS-BONNIVARD, R.; JAUD, P.; VALLE-MARCOS, J.; AMANN, J.; BOUALLOU, C. Pre-combustion, Post-combustion and Oxy-combustion in thermal power plant for CO capture. Applied Thermal Engineering, Elsevier, 2009, 30 (1), pp.53, 2009.

KOHL, A.; NIELSEN, R. Gas purification. 5 ed. Houston: Gulf Publishing Company, 1997.

LASOCKI, J.; KOŁODZIEJCZYK, K.; MATUSZEWSKA, A. Laboratory-Scale Investigation of Biogas Treatment by Removal of Hydrogen Sulphide and Carbon Dioxide. Polish Journal of Environmental Studies. v. 24, n. 3, p.1427-1434, 2015.

LEILEI, L.; ZHAO, B. Numerical Simulation of Gas and Liquid Flow within a Vortex Spray Tower. Elsevier, Energy Procedia, 2012.

LINDSEY, R. Climate change: atmospheric carbon dioxide. Fev/2020. Disponível em: <<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>>. Acesso em 28 abr. 2020.

LIU, Y.; LI, H.; WEI, G.; ZHANG, H.; LI, X.; JIA, Y. Mass transfer performance of CO₂ absorption by alkanolamine aqueous solution for biogas purification. *Separation and Purification Technology* 133, p. 476–483, 2014.

LOPES, A. S. Emissões de gases de efeito estufa em cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial. JUAZEIRO/BA: Universidade Federal do Vale do São Francisco. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). 2017. 78p.

MAGALHÃES, E. A.; SOUZA, S. N. M.; AFONSO, A. D. L.; RICIERI, R. P. Confecção e avaliação de um sistema de remoção do CO₂ contido no biogás. *Acta Scientiarum Technology*, Maringá, v. 26, n. 1, p. 11-19, 2004.

MARCATTO, T. I.; LIMA, L. A. Sociedade contemporânea e o Protocolo de Quioto: o mundo em prol do meio ambiente. *Revista Científica da Escola de Gestão e Negócios*, 2, 2013.

MEL, M.; MUDA, W.; NOORLAILI, W.; IHSAN, S. I.; ISMAIL, A. F.; YAACOB, S. Purification of biogas by absorption into calcium hydroxide Ca(OH)₂ solution. In: PERSIDANGAN KEBANGSAAN KEDUA PROGRAM PEMINDAHAN ILMU KEDUA (KTP02), 2014, Putrajaya, Malásia.

MENDOZA, A. A. S. Tecnologia alternativa para o monitoramento de poluentes gasosos. TOLEDO/PR: Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). 2016. 111p.

MOHAMMAD, J. J.; MATIN, A. H.; RAHMATI, A.; AZARI, M. R.; OMIDI, L.; HOSSEINI, S. S.; PANAHI, D. Experimental optimization of a spray tower for ammonia removal. Elsevier, Atmospheric Pollution Research, 2018.

MUKHERJEE, A.; OKOLIE, J. A.; ABDELRASOUL, A.; NIU, C.; DALAI, A. K. Review of post-combustion carbon dioxide capture technologies using activated carbon. Journal of Environmental Sciences, 83, 2019, p. 46- 63.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES- NAS. Methane Generation from human, animal, and agricultural wastes. Washington, 1977.

NIEMCZEWSKA, J. Characteristics of utilization of biogas technology. Nafta-gaz, v. 5, pp. 293–297, 2012.

PACHECO, M. R. P. S.; HELENE, M. E. M. Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO₂. Estudos avançados v. 4, n.9, 1990.

PEARCE, F. O aquecimento global: Causas e efeitos de um mundo mais quente. 2. Ed. São Paulo: Publifolha, 2002.

PINTO, E. P. P.; MOUTINHO, P.; RODRIGUES, L. Perguntas e respostas sobre aquecimento global. Belem: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, 2008

RITCHIE, H.; ROSER, M. Our world in data: CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. May/2017. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions#global-warming-to-date>>. Acesso em 28 abr. 2020.

RODRIGUES, R. D. Modelagem Numérica da Injeção de CO₂ em aquífero salino, objetivando avaliar o aprisionamento mineral. RIO DE JANEIRO/RJ: Pontifícia

Universidade Católica do Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). 2017. 107p.

ROSA, A. V. Processos de energia renováveis. 1. ed. São Paulo: Campus, 2014.

RUBIN, E. S.; MANTRIPRAGADA, H.; MARKS, A.; VERSTEEG, P.; KITCHIN, J. The outlook for improved carbon capture technology. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 38, p. 630- 671, 2012.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, n. 5, pp. 1633–1645, 2011.

SALMÓN, I. R.; CAMBIER, N.; LUIS, P. CO₂ capture by alkaline solution for carbonate production: a comparison between a packed column and a membrane contactor. *Revista Applied Sciences*, 8, v. 996, 15p, 2018.

SALMÓN, I. R.; JANSSENS, R.; LUIS, P. Mass and heat transfer study in osmotic membrane distillation-crystallization for CO₂ valorization as sodium carbonate. *Separation and Purification Technology*, 176, 2017, p. 173–183.

SANTOS, L. F.; SANTOS, A. L. A.; ROCHA, S. D. F. Fixação de CO₂ em efluente salino de indústria petroquímica. *Revista Química Nova*, Vol. 40, No. 7, p. 720-725, 2017.

SEADER, J. D.; HENLEY, E. J.; ROPER, D. K. Separation Process Principles: Chemical and Biochemical Operations. 3 ed. United States of America: John Wiley & Sons. Inc. 2011.

SRICHAT, A.; SUNTIVARAKORN, R.; KAMWILAISAK, K. A Development of Biogas Purification System Using Calcium Hydroxide and Amine Solution. *Energy Procedia* 138, p 441- 445. 2017.

SERPA, J.; MORBEE, J.; TZIMAS, E. Technical and Economic Characteristics of a CO₂ Transmission Pipeline Infrastructure. Ed. Luxembourg, 51p., 2011.

STOLAROFF, J. K.; KEITH, D. W.; LOWRY, G. V. Carbon dioxide capture from atmospheric air using sodium hydroxide spray. *Environmental Science & Technology*, 42,2008, p. 2728–2735.

SUBRAMANIAN, A. S. R.; JORDAL, K.; ANANTHARAMAN, R.; HAGEN, B. A. L.; ROUSSANALY, S. A Comparison of Post-combustion Capture Technologies for the NGCC. Elsevier, *Energy Procedia*, 2017.

TIPPAYAWONG, N.; THANOMPONGCHART, P. Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in a packed column reactor. *Energy*, v. 35, 12, Dec. 2010, p. 4531-4535.

YOO, M.; HAN, SANG-JUN; WEE, JUNG-HO. Carbon dioxide capture capacity of sodium hydroxide aqueous solution. *Revista Journal of Environmental Management* 114, p. 512- 519, 2013.

ZEMAN, F. S.; LACKNER, K. S. Capturing carbon dioxide directly from the atmosphere. *World resource review*, v. 16, n. 2, 2004, p. 157- 172.

ZHENQI, NIU & GUO, YINCHENG & WENYI, LIN. (2009). Experimental Studies on CO₂ Capture in a Spray Scrubber using NaOH Solution. 2009 International Conference on Energy and Environment Technology, ICEET 2009. 3. 52 - 55. 10.1109/ICEET.2009.479.

WEILAND, P. Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v.85, p.849-860, 2010.

WELTY, J. R., WILSON, R. E. e WICKS, C. E. "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer", 4 thEd. John Wiley & Sons, 2007.

WONG, S.; BIOLETTI, R. Carbon dioxide Separation Technologies. *Carbon & Energy Management*, Alberta Research Council, Edmonton, Alberta, Canadá, 2002.